

上海市、江苏省职工高校试用教材

半 导 体 变 流 技 术

章宇先 施允琨 任国光 编

上海科学技术文献出版社

上海市、江苏省职工高校试用教材

半导体变流技术

章宇先 施允琨 任国光 编

上海科学技术文献出版社出版
(上海市武康路2号)

本书在上海发行所发行
上海市印十三厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 13.75 字数 343,000

1986年3月第1版 1986年3月第1次印刷

印数: 1—5,500

书号: 15192·438 定价: 2.60元

《科技新书目》113-228

前 言

“半导体变流技术”是职工高等工业专科学校工业电气自动化专业的一门专业课程。本书是按照全国高校工业自动化专业教育委员会 1983 年 9 月在苏州会议上审定的该课程教学大纲,由上海市高等教育局、上海市教育局和江苏省教育厅共同组织编写的。

本书的主要内容有:半导体大功率变流器件、整流器主电路、逆变器主电路、其它变流器主电路、主电路设计计算、半导体变流技术应用实例等。

本书可作为职工高等工业专科学校工业电气自动化专业的试用教材,也可供其它有关专业师生及工程技术人员参考。

本书由章字先同志担任主编。其中第一、四、五章由施允琨同志编写,第六、七章由任国光同志编写,其余由章字先同志编写。

本书的讨论稿于 1984 年 8 月在青岛召开的审稿会议上经讨论审定。西安交通大学黄俊同志任本书主审。参加审稿讨论的有上海卢湾区业余大学,北京内燃机职工学院,青岛市职工业余大学,二汽职工大学,汕头市职工业余大学,上海冶金专科学校分校,一汽职工大学、马鞍山钢铁学院等兄弟院校的代表。与会者对本书的讨论稿曾提出不少宝贵意见,在此谨表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,得到了上海第二工业大学控制系统教研室全体同志的支持,特别是史介宁同志提出的一些建议对本书的编写提供了极为有益的帮助。

上海整流器厂凌俊发工程师和上海电压调整器厂蒋光祖工程师在本书的编写过程中提供了不少资料,陈谦勇同志对本书的部分文稿、图稿进行了认真的核对,在此一并致以深切的谢意。

由于我们的学识肤浅,书中错误、缺点在所难免,恳请读者不吝指正。

编 者

1984 年 12 月

目 录

绪论	1
第一章 半导体大功率变流器件	5
第一节 大功率二极管的结构和工作原理	5
第二节 大功率二极管的伏安特性及主要参数	6
第三节 晶闸管的结构和工作原理	8
第四节 晶闸管的伏安特性及主要参数	11
习题	17
第二章 整流器主电路	19
第一节 整流的概念	19
第二节 单相半波可控整流电路	19
第三节 单相双半波可控整流电路	34
第四节 单相桥式全控整流电路	38
第五节 单相桥式半控整流电路	45
第六节 三相半波可控整流电路	51
第七节 三相桥式全控整流电路	55
第八节 三相桥式半控整流电路	63
第九节 双反星形可控整流电路	70
第十节 变压器漏抗对整流电路的影响	76
第十一节 整流工作状态下直流电动机的机械特性	79
习题	88
第三章 逆变器主电路	92
第一节 逆变的概念	92
第二节 单相逆变电路	94
第三节 三相逆变电路	97
第四节 逆变的颠覆	101
第五节 逆变工作状态下直流电动机的机械特性	103
第六节 整流逆变可逆电路	106
习题	111
第四章 其他变流器主电路	112
第一节 变频器主电路	112
第二节 斩波器主电路	122
第三节 交流调压器主电路	128
习题	134
第五章 主电路设计计算	136
第一节 主电路型式及合理选用	136
第二节 整流变压器的参数计算	136
第三节 大功率整流元件的选择	142

第四节 晶闸管的保护电路	147
第五节 电抗器参数的计算	154
习题	158
第六章 晶闸管的触发电路	159
第一节 主电路对触发电路提出的要求	159
第二节 同步的原理与方法	161
第三节 单结管移相触发电路	164
第四节 正弦波垂直移相触发电路	171
第五节 锯齿波垂直移相触发电路	177
习题	185
第七章 半导体变流技术应用实例	187
第一节 整流技术的应用——ZTMK ₃ 型转差离合器控制装置	187
第二节 逆变技术的应用——KJSA型晶闸管串级调速装置	191
第三节 变频技术的应用——JBP型静止变频器	196
第四节 斩波技术的应用——KDS ₄ 系列蓄电池车辆控制装置	203
第五节 交流调压技术的应用——KTAI-10/1×220型晶闸管调压器	207
习题	210
符号说明	211
参考文献	213

绪 论

一、什么是变流技术

简单地说,变流技术是改变电流性质或改变某个电流参数的技术。众所周知,电工学把电流分为交流电和直流电两类不同性质的电流。但就其中任何一类电流而说,实际上还存在着频率、幅度等具体参数上的区别,这也可以说成是工业生产对电源提出了千差万别的要求。显然,仅靠单一的交流和直流电网是不能如愿以偿的,这就需要采用变流技术来实现电网与负载之间的匹配。就此而言,变流技术实质上是工业电子学的一个组成部分,所以也有人把它称为电力电子技术。

按照变流的内容可以把变流技术大致分为五类:

1. 交流变直流技术——工频(或某个频率)交流电经过变流装置变换为固定的或者是可调电压的直流电。这种变流装置称为整流器,这种技术称为整流技术。
2. 直流变交流技术——固定电压(或者在一定范围内变化的电压)的直流电经过变流装置变换为固定电压的交流电(一般指工频)。这种变流装置称为逆变器,这种技术称为逆变技术。
3. 电压范围内直流变直流技术——固定电压的直流电经过变流装置改变为可调电压的直流电。这种变流装置称为斩波器,这种技术称为斩波技术。
4. 电压范围内交流变交流技术——工频交流电(固定电压的)经过变流装置改变为可调电压的工频交流电。这种变流装置称为交流调压器,这种技术称为交流调压技术。
5. 频率范围内交流变交流技术——固定频率的工频交流电经过变流装置改变为可调频率的交流电。这种变流装置称为变频器,这种技术称为变频技术。

与电子技术的其它领域相类似,变流技术研究的内容也包括两个方面——器件和电路。

早在五十年代,大功率半导体器件尚未发明,人们就已经利用变流技术为生产服务。不过那时的变流装置一般由变流机组、大功率的电子器件(汞整流器、闸流管等)、常用电器(感应变压器、接触器等)构成,而这些变流装置在变流性能上都存在一定的弊病,如功率放大倍数低、响应慢、功耗大、效率低等等。

五十年代后期,人们发明了晶闸管,这种大功率半导体变流器件的诞生及其性能指标上的不断提高为变流技术开辟了一条崭新的道路。近二十多年来,晶闸管正以其优越的性能逐步取代闸流管、汞整流器、引燃管、机组等老一代的变流器件。

晶闸管的优越性表现在重量轻、体积小、效率高、快速、功耗低、控制灵敏等方面。所以在大功率变流技术领域,晶闸管的作用已愈来愈为人们所重视,采用晶闸管的变流装置在国民经济中的应用也将会与日俱增。

有了先进的器件还必须配备合理的电路,这样才能完美地实现变流的目的。六十年代初期以来,伴随着晶闸管在我国试制成功,在变流技术的电路研究上,我国的科技工作者经历了资料积累、消化研制、不断创新的过程。由此而出现了一大批经过实践检验的

电路型式, 逐步形成了一支庞大的应用队伍, 把我国的晶闸管变流技术推向一个新的水平。

现在, 我国已经初步具备了系列生产晶闸管及其派生元件的能力, 许多专业化的变流装置也已经朝着标准化、系列化和高可靠性的方向迅猛地发展。

二、晶闸管变流技术的应用概况

按理来说, 半导体变流技术应是由半导体器件来实现变流的。当然, 半导体器件不应局限于晶闸管一种, 特大功率的晶体管也可以充当变流器件。事实上, 国内外也都在研制晶体管变流装置。但就目前的制造水平而言, 大功率晶体管的电压、电流容量尚无法与晶闸管相提并论。所以目前的半导体变流技术的主要内容还是晶闸管变流技术。

晶闸管变流技术在我国已经被广泛地应用于国民经济各个部门。其中较为突出的是冶金、机械、石油、化工、轻工、建筑和国防等技术密集的工业部门。其次, 农业、交通、医学等领域也正在逐步开展这方面的应用。下面就五类变流技术的主要应用情况作一简单的介绍。

(一) 整流技术的应用

(1) 调压调速可控直流电源

这种电源广泛地应用在直流拖动系统中, 功率在 5000 千瓦以上的电源主要用在冶金系统的直流轧机上。5000 千瓦以下的电源用在矿山、机床、造纸、纺织、印染、制糖等行业。中小功率的直流拖动技术比较成熟, 这类电源在国内一些厂家已形成了系列产品。

(2) 电解、电镀用直流电源

这是在大容量范围内应用较为成熟的一种。它代替汞弧整流, 避免了环境污染, 并能节约电能, 提高工艺质量。

(3) 蓄电池快速充电电源

利用晶闸管的开关特性, 控制充放电时间, 使充电的电化学过程加快, 达到节能的目的。

(4) 高压静电喷涂电源

把欲喷涂的工件置于高压静电场内, 利用微粒凝聚原理进行喷涂。工艺先进, 易于自控, 避免有毒物质对人体的危害。

(5) 矿山机车、地铁、城市电车用直流电源

为直流机车、地铁列车、城市电车提供一个固定电压的直流电源是对它们进行调速的前提。

(二) 逆变技术的应用

(1) 可逆直流拖动系统的逆变环节

为了把直流拖动系统在制动时的机械能量加以回收利用和改善电机的制动性能而设置的环节。

(2) 绕线式异步电动机串级调速

这是交流绕线式异步电机的调速方法之一。它能把转差能量回馈电网, 达到节能的效果。目前, 这种调速方法运用较广泛, 国内也有系列产品。

(3) 高压直流输电

在高压直流输电的用电侧, 把直流电能转变为交流电能, 供用户使用。这种输电方式在

跨越江河、海峡的输电中和大容量远距离输电中具有较大的优越性。

(4) 不停电电源

用于严格连续供电的场合。当电网断电时,把蓄电池电能逆变成交流电能供使用。

(三) 斩波技术的应用

(1) 矿山机车的直流脉冲调速

以晶闸管作为直流开关,变直流为断续的矩形波。只要控制波形的占空比,就能改变电压平均值,从而进行调速。

(2) 地铁和城市电车的脉冲调速

这种调速的特点是节电、维护保养简单。但由于负荷率高,要求装置的可靠性强,从而保证交通车辆的安全行驶。

(3) 蓄电池叉车的脉冲调速

这种装置应用面极广,几乎所有的工矿企业都需要这类搬运工具。节能这个特点在此更具有现实意义。

(4) 各种电加工机床电源

这类电源又称脉冲直流电源。它把斩波技术与脉冲成形电路结合起来,改变脉冲的形状与间隔,达到对不同机械模具的加工要求。

(四) 交流调压技术的应用

(1) 交流调压器和交流调功器

采用移相触发的交流调压器可用来代替感应调压器,应用于摄影棚和舞台的调光照明以及电热负载的温度控制中。采用过零触发的交流调功器则可代替感应调压器,应用于热惯性较大的电热负载,或者用于通断比较大的调光负载上。

(2) 交流电子开关

代替有触点的交流接触器,用于交流电路的切换。这种开关的特点是无触点、寿命长。

(3) 交流调压调速

代替感应变压器对交流异步电动机定子供电,并调压调速,是交流电机调速方法之一,还能通过改变相序使电机可逆运行。

(五) 变频技术的应用

(1) 交流异步电动机的变频调速

这种装置的功能是变工频交流电能为所需频率的交流电能。采用变频、变压的方法对异步电动机供电是较为理想的高效率交流调速方案。

(2) 晶闸管中频感应电炉电源

这是一种采用交—直—交变频结构将三相工频电能转变为单相中频电能的装置。所以,在热处理和金属熔炼中广泛得到应用,是一种比较成熟的变流装置。

(3) 晶闸管超同步串级调速

这是一种较高级的绕线式异步电动机串级调速方法。它采用交—交变频的电路结构,效率较高。这种方法还能使电机实现同步速上下两个方向的宽调速及电动、制动两种方式的运行。

三、学习方法问题

“半导体变流技术”是高等专科学校工业电气自动化专业的一门专业课程。它在内容

上既有较为完整的基础理论,又具备较为丰富的应用实践。在学习过程中,要注意以下几点:

1. 以变流装置中的主电路(特别是整流、逆变主电路)、触发电路、保护电路的工作原理和基本概念为主,以变流技术在生产实践中的运用为辅,理论联系实际地学习。

2. 在学习工作原理和基本概念中要抓住波形分析这个重要环节。用波形分析研究工作原理,用波形分析来推导计算公式是学习各类变流电路的一般规律。

3. 在搞清原理的基础上,逐步培养设计计算、调试、排除故障的能力,达到发展、创新的目的。

第一章 半导体大功率变流器件

本章主要讲述半导体变流技术中使用的大功率半导体器件,其中包括不可控的大功率二极管以及可控的晶闸管两大类。第一、二节介绍大功率二极管的结构、工作原理、特性和参数,第三、四节介绍晶闸管的结构、工作原理、特性和参数。

第一节 大功率二极管的结构和工作原理

一、大功率二极管的结构

大功率二极管有两个电极,即阳极 A 和阴极 C,电路符号见图 1-1(b)。大功率二极管按结构形式可分为螺栓型和平板型两种,其中螺栓型大功率二极管的结构如图 1-1(a)、(c)所示。图中 1 为管芯,2 为管壳,3 为引出电极,4 为散热器。管芯是一个两层两端的半导体器件,实质上就是在单晶硅片上用半导体工艺制成的一个 PN 结。管芯决定了二极管的电性能。由于在二极管管芯内通过较大的电流,PN 结又具有一定的正向电阻,因而管芯要发热。依靠二极管阳极上的螺栓把这些热量传给散热器,散热器与循环着的冷却介质(空气,水,油等)之间存在着热交换,这样就解决了管芯的散热问题。平板型大功率二极管的外形(未带散热器)见图 1-1(d),它的两个平面分别是阳极和阴极。在使用时,用两个互相绝缘的散热器把二极管夹在中间,故散热效果好。200 安以上的大电流整流管大多采用平板型。

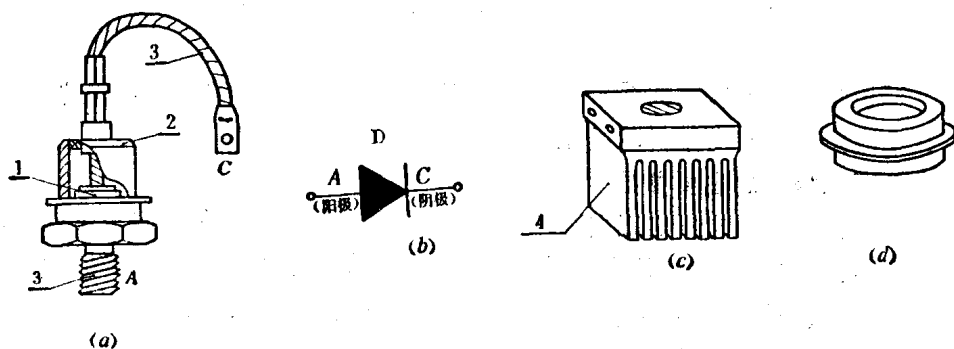


图 1-1 大功率二极管的结构

二、大功率二极管的工作原理

大功率二极管与普通的中小功率二极管一样,具有单向导电性。当二极管的阳极加上正电压,阴极加上负电压时[如图 1-2(a)],PN 结处于正向偏置,二极管处在导通状态,电流通过二极管 D 使灯泡发亮。

反之,如把电路接成图 1-2(b)那样,则 PN 结处于反向偏置,二极管处在关断状态,电流无法通过,因而灯泡不亮。

正因为大功率二极管具备上述的单向导电性,所以才被人们广泛地应用在变流装置中。



图 1-2 大功率二极管的单向导电性示意电路

第二节 大功率二极管的伏安特性及主要参数

一、大功率二极管的伏安特性

二极管的阳极和阴极间的电压和管中流过的电流的关系称为伏安特性。由实验测得的

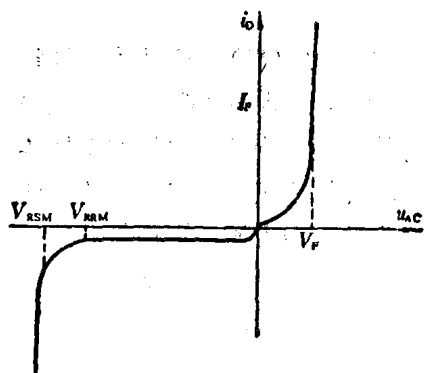


图 1-3 大功率二极管伏安特性曲线

二极管伏安特性如图 1-3 所示。

在二极管上加上由零逐渐增大的正向电压，开始器件中只有很小的电流。这一段特性曲线很靠近横坐标轴。但当电压加到超过 0.5 伏时，正向电流急剧上升。以后电流上升的速率近乎不变，曲线呈现为很陡的一段直线。如不限制电流上升，则二极管最终将烧毁。

当二极管上加有由零逐渐增大的反向电压时，起始段的反向泄漏电流也极小，而且随着电压增加，反向电流几乎增大不多。但当反向电压增加到称为反向

不重复峰值电压的数值(图 1-3 中的 V_{RSM})后，电流就开始急剧增加。同样，如果对电压不加限制的话，二极管也将被电压击穿而损坏。

大功率二极管的伏安特性曲线与中小功率二极管的伏安特性曲线大致相同，所不同的就是二者在电流定额上有着数量级的差别。

二、大功率二极管的主要参数

大功率二极管的参数有额定正向平均电流、反向重复峰值电压和反向不重复峰值电压、正向压降平均值、反向不重复平均电流、浪涌电流、额定结温、额定电流下的结温升、整流结-散热器之间的热阻、电流过载倍数、冷却方式等等，这里就其常用的主要参数作一介绍。

(一) 额定正向平均电流 I_F

在规定的环境温度 $+40^{\circ}\text{C}$ 和标准散热条件下，容许长时间连续流过的工频正弦半波电流的平均值。测试时必须保证管子结温稳定在额定值上。在实际工作中，管子允许通过电流的有效值为 $1.57I_F$ 。详细说明参见“晶闸管的伏安特性及主要参数”一节。

(二) 反向重复峰值电压 V_{RRM}

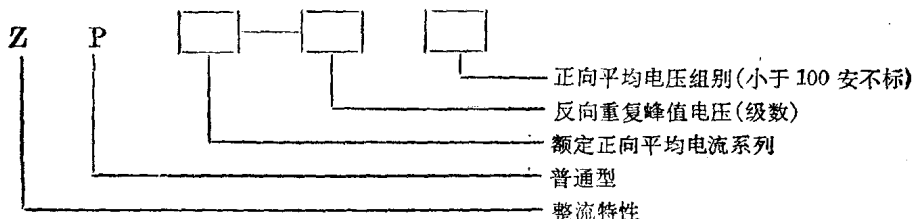
在额定结温条件下，元件反向伏安特性曲线急剧弯曲处所对应的反向峰值电压称为反向不重复峰值电压 V_{RSM} 。在元件出厂时，取反向不重复峰值电压的 80% 作为反向重复峰值电压，用 V_{RRM} 表示。只有已知电路中大功率二极管承受的最大的工作峰值电压后，才能合理地选择大功率二极管的额定电压等级，并适当保留一定的余量，以应付实际工作条件下的电压突变。有时也称 V_{RRM} 为大功率二极管的额定电压(用 V_R 表示)。

(三) 正向平均电压 V_F

在规定环境温度 $+40^{\circ}\text{C}$ 和标准散热条件下, 元件通以 50 赫正弦半波额定正向平均电流至稳定额定结温, 元件阳、阴极之间电压的平均值称为正向平均电压 V_F 有时也称 V_F 为大功率二极管的管压降。

三、大功率二极管的型号

按一机部标准 JB1144-75 规定 ZP 型大功率硅二极管型号命名如下:



大功率硅二极管按额定正向平均电流的大小分为十四个系列, 见表 1-1。大功率硅二极管按反向重复峰值电压的高低分级, 在 1000 伏以下的每 100 伏为一级, 1000 伏以上到 3000 伏的每 200 伏为一级, 用百位数或千位数和百位数表示级数, 见表 1-2。大功率硅二极管按正向平均电压的高低分为九组, 见表 1-3。

表 1-1 按额定正向电流分的系列

系列代号	额定电流 $I_F(\text{A})$	系列代号	额定电流 $I_F(\text{A})$
1	1	200	200
5	5	300	300
10	10	400	400
20	20	500	500
30	30	600	600
50	50	800	800
100	100	1000	1000

表 1-2 按反向重复峰值电压分的级别

反向重复峰值电压 (V)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
级数代号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
反向重复峰值电压 (V)	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
级数代号	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30

表 1-3 按正向平均电压分的组别

正向平均电压 (V)	$V_F \leq 0.4$	$0.4 < V_F \leq 0.5$	$0.5 < V_F \leq 0.6$	$0.6 < V_F \leq 0.7$	$0.7 < V_F \leq 0.8$
组别代号	A	B	C	D	E
正向平均电压 (V)	$0.8 < V_F \leq 0.9$	$0.9 < V_F \leq 1.0$	$1.0 < V_F \leq 1.1$	$1.1 < V_F \leq 1.2$	
组别代号	F	G	H	I	

表 1-4 ZP 型大功率硅二极管参数

参 数 系 列	额定正向 平均电流 I_F (A)	反向重复 峰值电压 V_{RRM} (V)	反向不重复 平均电流 I_{RS} (mA)	反向重复 平均电流 I_{RR} (mA)	浪涌电流 I_{FSM} (A)	正向平均 电 压 V_F (V)	额定结温 T_{JM} (°C)	额定结温升 ΔT_{JE} (°C)
ZP1	1	100~3000	≤ 1	< 1	40	0.4~1.2	140	100
ZP5	5		≤ 1	< 1	180			
ZP10	10		≤ 1.5	< 1.5	310			
ZP20	20		≤ 2	< 2	570			
ZP30	30		≤ 3	< 3	750			
ZP50	50		≤ 4	< 4	1260			
ZP100	100		≤ 6	< 6	2200			
ZP200	200		≤ 8	< 8	4080			
ZP300	300		≤ 10	< 10	5650			
ZP400	400		≤ 12	< 12	7540			
ZP500	500		≤ 15	< 15	9420			
ZP600	600		≤ 20	< 20	11160			
ZP800	800		≤ 20	< 20	14920			
ZP1000	1000		≤ 25	< 25	18600			

例如, ZP 500-8B 表示额定正向平均电流为 500 安、反向重复峰值电压为 800 伏, 正向平均电压在 0.4 伏与 0.5 伏之间的普通型硅二极管。

十四个系列的大功率硅二极管比较完整的参数列于表 1-4 中, 供选用时参考。表内正向平均电流定额均指强迫风冷条件下的额定电流值, 若用水、油冷却时, 其额定值可以相应地增加。

第三节 晶闸管的结构和工作原理

一、晶闸管的结构

晶闸管是普通晶闸管、双向晶闸管、可关断晶闸管、逆导晶闸管、光控晶闸管、快速晶闸管等半导体器件的总称, 而习惯上又把晶闸管作为普通晶闸管的简称。本节讨论的晶闸管就是大量而广泛使用的一般普通晶闸管。

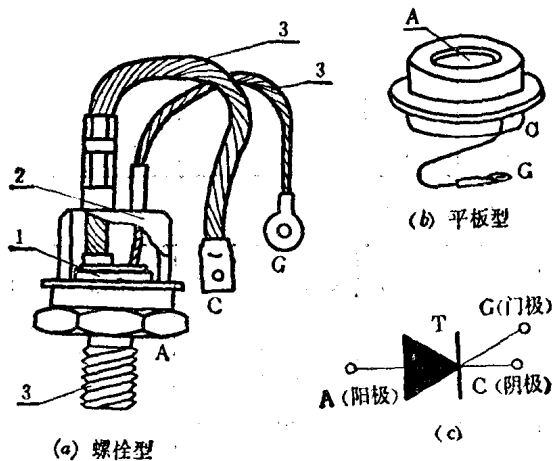


图 1-4 晶闸管的结构及符号

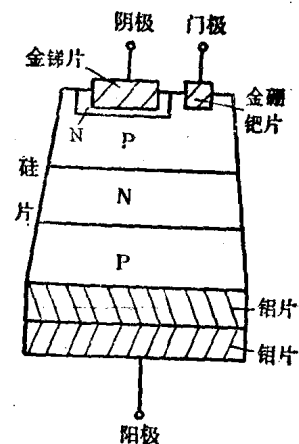


图 1-5 晶闸管芯片

晶闸管又名硅可控整流器(简称可控硅, 英文缩写为 SCR)。晶闸管有三个电极: 阳极 A、阴极 C 和门极 G, 见电路符号图 1-4(c)。

晶闸管按结构形式可分为螺栓型和平板型两种。其中螺栓型晶闸管的结构如图 1-4(a)所示。图中 1 为管芯, 2 为管壳, 3 为引出电极。晶闸管的散热器与大功率二极管的散热器相同, 参见图 1-1(c)。

平板型晶闸管外形如图 1-4(b)所示, 它的门极是在阳极和阴极的中间引出。晶闸管管芯是一个四层三端的半导体器件, 管芯的内部结构示意图于图 1-5 中, 它是在 N 型硅基片两面上采用半导体工艺而制成的。由三个 PN 结组合成的管芯决定了晶闸管的电性能。

晶闸管是大功率半导体器件, 它在工作过程中会耗散一部分电能, 继而又以热能的形式释放出来, 依靠与晶闸管紧密接触的散热器, 将这些热量传递给冷却介质。螺栓型晶闸管, 是利用管壳下端的螺栓与散热器联结起来的。这种晶闸管在安装和更换时比较方便, 但散热效果较差。因此, 只在部分 100 安以下的系列中采用。对于平板型晶闸管, 它的两个平面分别是阳极和阴极, 管子中间的金属环是门极。用两个互相绝缘的散热器把晶闸管紧紧地夹在中间。平板型晶闸管的散热效果较好, 但安装和更换比较麻烦。目前, 200 安以上的晶闸管都采用平板型结构。

二、晶闸管的工作原理

为了搞清晶闸管的工作原理, 让我们先通过一个实验找到晶闸管导通和关断的规律。实验电路如图 1-6 所示。晶闸管的主电路由晶闸管阳极 A、阴极 C、阳极电源、灯泡负载、滑线电阻及毫安表(一般情况下用开关 K 短路)串联而成。晶闸管的门极电路(触发电路)由门极 G、阴极 C、限流电阻 R_g 、门极电源串联而成。由于实验需要, 阳极电源和门极电源均由电压大小和极性可以变化的电路组成。电压表用来监视晶闸管极间电压 U_{GC} 和 U_{AC} 。

现按下列步骤进行实验:

1. 调节 W_a 使 $U_{AC} \leq 0$, 调节 W_g 分别使 $U_{GC} \leq 0$ 和 $U_{GC} > 0$, 在这两种情况下, 灯泡均不亮。
2. 调节 W_a 使 $U_{AC} > 0$, 调节 W_g 使 $U_{GC} \leq 0$, 灯泡也不亮。
3. 调节 W_a 使 $U_{AC} > 0$, 调节 W_g 使 $U_{GC} > 0$, 此时灯泡发光, 这说明当晶闸管的阳极和门极均加上正向电压后, 晶闸管就导通。
4. 在灯亮的条件下, 调节 W_g 使 $U_{GC} \leq 0$, 发现灯泡仍然亮着。也就是说, 晶闸管导通以后, 门极已失去控制作用。
5. 在灯亮的条件下, 逐渐调节 W_a , 使 U_{AC} 减小或调节滑线电阻使其阻值增大, 灯泡就逐渐由亮变暗。此时打开 K, 可发现毫安表仍有电流指示, 说明晶闸管仍保持导通状态。继续慢慢地调节 W_a 使 U_{AC} 继续减小或增大滑线电阻的阻值, 注意观察毫安表中的指针。当主回路中电流降到某一数值(一般为几十毫安)以下, 毫安表指针突然迅速回到零点。此时说明晶闸管已关断。这个能保持晶闸管导通的最小电流称为维持电流(以 I_H 表示)。

总结以上的实验结果, 我们可以得到两条主要规律:

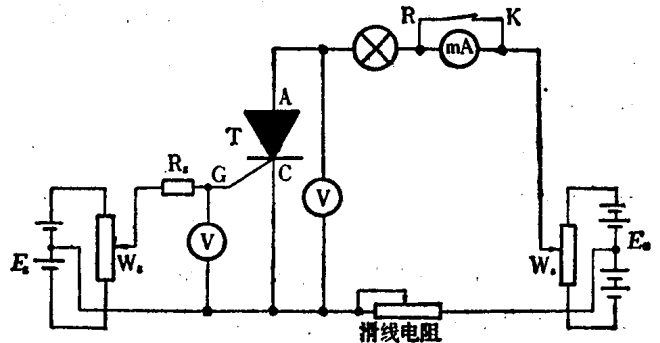


图 1-6 晶闸管开关规律实验

1. 正向阳极电压和正向门极电压同时具备时, 晶闸管才会触发导通。这是晶闸管由阻断到导通的条件。

2. 晶闸管一旦导通, 门极失去对晶闸管的控制, 只有当通过晶闸管中的电流小于维持电流, 晶闸管才会关断(减小管内电流的方法可以是减小电源电压或增大回路电阻)。这是晶闸管由导通到阻断的条件, 或简称为关断条件。

为了进一步认识晶闸管的导通和关断的规律, 有必要分析晶闸管的内部工作过程。

晶闸管管芯是四层三端器件, 它有 J_1 , J_2 和 J_3 三个 PN 结, 见图 1-7(a)。可以人为地把它看成是一个 PNP 型三极管和一个 NPN 型三极管如同图(b)那样联成一体。为了便于分析, 晶体管用电路符号表示, 并把它接在图(c)表示的电路中。

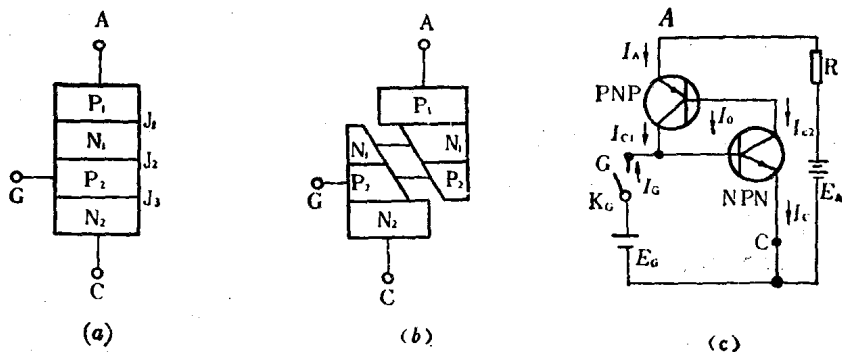


图 1-7 晶闸管工作原理分析

从图 1-7(c)可以清楚地看到, 两个晶体管连接的特点是: 一个晶体管的集电极回路同时就是另一个晶体管的基极回路。所以, 当有足够的门极电流 I_G 流入时, 就会形成强烈的电流正反馈。

在电子技术中, 已经把晶体管的共基极电流放大系数 α 定义为集电极电流与发射极电流之比, 即

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e} = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (1-1)$$

在图 1-7(c)中, 闭合开关 K_G , 如设此时由阳极流入 PNP 管的电流为 I_A , 它就是 P_1 区域的空穴扩散电流, 因而流过 J_2 的电流可由 PNP 管的电流放大系数 α_1 决定, 其值为 $\alpha_1 I_A$, 而阴极电流 I_C 在 N_2 区域是一个电子扩散电流, 所以流过 J_2 的电流为 $\alpha_2 I_C$ 。当然流过 J_2 的还有反向漏电流 I_0 。可以把两个晶体管分别看作两个广义节点, 运用基尔霍夫电流定律

写出电流关系式:

$$I_A = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_C + I_0 \quad (1-2)$$

$$I_C = I_A + I_G \quad (1-3)$$

把(1-3)代入(1-2)整理后求得

$$I_A = \frac{I_0 + \alpha_2 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-4)$$

硅 PNP 管和硅 NPN 管相应的电流放大系数 α_1 、 α_2 随其发射极电流的大小而变化的规律见图 1-8。当门极电流 I_G 很小时, 发射极电流也较小, 所以 α 也小。

当门极电流 I_G 增大到足够时, α_2 相应增大, I_{C2} 也增大, 由此产生更大的 I_{C1} , 再使 α_2 继续增大。这种正反馈作用, 很快就使 $\alpha_1 + \alpha_2$ 趋于 1。那么, 由式(1-4)可知, 电流将变得极大, 以

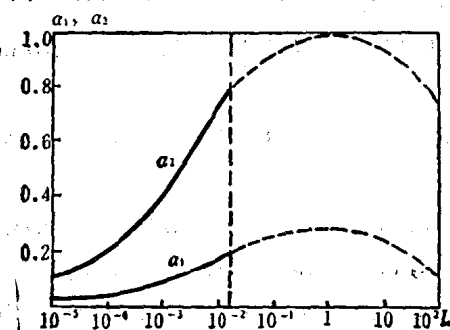


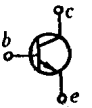
图 1-8 PNP、NPN 晶体管 $\alpha-I_e$ 关系

至于不能在晶闸管内部被控制。这时,晶闸管进入导通状态,流过晶闸管的电流将由外部电源和回路电阻决定。以上就是晶闸管由阻断到导通所遵循的规律。下面再看晶闸管由导通到阻断的情况。在晶闸管已处于导通的情况下,由外界电源 E_a 提供的晶闸管电流 I_A 远大于先前注入门极的电流 I_G , 足够维持管子的导通,所以此时 I_G 是否存在已无关紧要了。要想关断晶闸管只能从减小管内电流着手,只有当管内电流减小到维持电流(约数十毫安)以下, $\alpha_1 + \alpha_2$ 数值才开始变小,又进一步使管内电流变小。依靠正反馈的作用,很快使晶闸管的电流为零,管子关断。这就是晶闸管由导通到阻断所遵循的规律。

三、晶闸管、晶体管、二极管在开关特性上的比较

二极管、晶体管、晶闸管都是半导体器件,都可在开关状态下工作。但是由于各自在结构上的不同,导致了它们在开关性能上的差异。二极管是一种二层两端的半导体器件,它有一个 PN 结,所以具有单向导电性。但是这种导电性是不受其它信号控制的。它的电路模型是一个不可控的单方向开关。晶体管是一种三层三端半导体器件,它有两个 PN 结,所以它必须在其它信号控制下才能具有单向导电性。它的电路模型是一个导通可控和关断可控的单向开关。晶闸管是一种四层三端半导体器件,它有三个 PN 结。它在导通前是受其它信号控制的,而在导通以后就不受控制。它的电路模型是一个导通可控关断不可控的单向开关。

表 1-5 二极管、晶体管、晶闸管三种半导体器件开关特性的比较

名 称	符 号	PN 结个数	电 路 模 型	极间正向电阻 (Ω)		极间反向电阻 (Ω)	
二极管		1	不可控制的单向开关	A、C 之间	$10^1 \sim 10^2$	A、C 之间	$10^4 \sim 10^5$
晶体管		2	可控的单向开关	b、c 间 b、e 间 c、e 间	$10^1 \sim 10^2$ $10^1 \sim 10^2$ $10^4 \sim 10^5$	b、c 间 b、e 间 c、e 间	$10^4 \sim 10^5$ $10^4 \sim 10^5$ $10^4 \sim 10^5$
晶闸管		3	导通可控, 关断不可控的单向开关	G、C 间 A、C 间 A、G 间	$10^0 \sim 10^1$ $10^4 \sim 10^5$ $10^4 \sim 10^5$	G、C 间 A、C 间 A、G 间	$10^1 \sim 10^2$ $10^4 \sim 10^5$ $10^4 \sim 10^5$

按照这三种半导体器件内部 PN 结的排列情况,可以用一般的万用表的电阻测量档来判断某种器件的好坏。三种器件的极间正向和反向电阻范围示于表 1-5 中。在测量过程中要注意的是万用表的红表棒是表内电池的负极,而黑表棒才是表内电池的正极。按此规律才能确定测量的正方向和反方向。

第四节 晶闸管的伏安特性及主要参数

晶闸管是一个三端半导体器件,所以它的伏安特性应包括阳极伏安特性和门极伏安特性。

一、晶闸管阳极伏安特性

晶闸管阳极伏安特性就是晶闸管阳极与阴极之间电压和晶闸管阳极电流的关系。

晶闸管的阳极伏安特性曲线见图 1-9。正向伏安曲线在坐标的第 I 象限内,反向伏安特性位于第 III 象限内。先看正向特性。图中 $I_{G0}=0$ 的曲线表示门极开路的情况下的阳极

伏安特性。曲线的第(1)段,晶闸管处于阻断状态。在正向电压较小时,元件只有很小的电

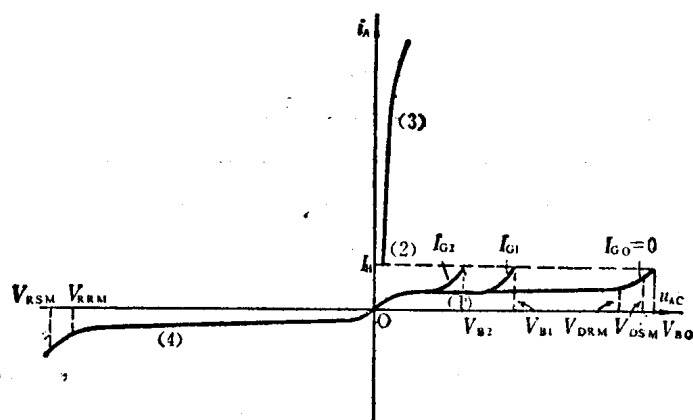


图 1-9 晶闸管阳极伏安特性曲线

流(称正向漏电流)流过。当阳极电压上升到门极开路转折电压 V_{BO} 时,漏电流突然剧增,晶闸管立即由阻断状态转化为导通状态,即正向特性曲线的第(2)段。晶闸管导通后,阳极电流取决于电源电压和回路电阻的大小,而晶闸管本身的管压降却很小。在正常工作时,不允许采用把正向阳极电压加到门极开路时的转折值 V_{BO} 的方法,使晶闸管导

通,而应当给门极输入足够的触发电流降低其转折电压值,并在这种情况下,使晶闸管导通。在图 1-9 中 $I_{G2} > I_{G1} > I_{G0}$, 故对应应有 $V_{B2} < V_{B1} < V_{BO}$ 。曲线(3)表示了晶闸管处于导通状态。在晶闸管导通以后,逐步减小阳极电流。当 i_A 小于 I_H 时,晶闸管便从导通状态转化为阻断状态。

下面再分析反向伏安特性,即曲线的第(4)段。当晶闸管承受较小反向电压时,反向漏电流也是极小的,晶闸管处于反向阻断状态。当反向电压增加到一定数值($\geq V_{RSM}$)时,反向漏电流急剧增大。若再继续增大反向阳极电压,则会导致晶闸管反向击穿,造成晶闸管损坏。

从上述的阳极伏安特性上看出:晶闸管并不是一个理想的开关,也就是说,晶闸管在导通时,内阻并不为零,而在阻断时,内阻也并不等于无穷大。导通时存在电阻,意味着晶闸管流过电流后要产生压降,并且存在一定的功率耗散,这是晶闸管工作时所以发热的主要原因。阻断时,电阻不为无穷大,意味着晶闸管存在一定的漏电流,同样也要消耗一些功率。

二、晶闸管门极伏安特性

晶闸管的门极与阴极间是一个 PN 结,但是它的正向特性并不象普通二极管那样具有较小的正向电阻及较大的反向电阻。有时它的正反向电阻是相当接近的。又因为元件存在着较大的离散性,所以同一型号的晶闸管表现出高阻和低阻的不同特性(见图 1-10)。这常用一条典型的高阻极限伏安特性曲线与一条低阻极限伏安特性曲线之间所夹的区域表示某种型号的晶闸管门极伏安特性。如果考虑到在正常使用中,门极承受过大的电压、过大的电流和过大的功率都不利于晶闸管的正常工作,甚至产生晶闸管门极击穿或烧毁的后果,所以施加于门极的电压、电流和功率应有所限制。另外考虑到图 1-10 所示的在接近坐标原点的那部分门极伏安特性区域内的门极电压和门极电流都比较小,一般不能可靠地触发晶闸管,所以,触发装置输送给门极的触发电压和触发电流的大小只能处于图 1-10 中的斜线区内。图中 I_{GM} 是门极正向峰值电流, V_{GM} 是门极正向峰值电压, P_{GM} 是门极峰值功率, P_G 是考虑触发脉冲占空比以后的平均功率, I_{GT} 是门极触发电

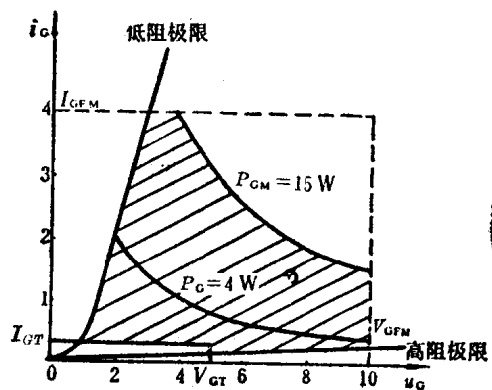


图 1-10 晶闸管门极伏安特性曲线