

第17篇 整流器和变流装置

主 编	宫 入 庄 太	(東京工業大学)	
执 笔 者	池 田 吉 堯	(横浜国立大学)	
	今 井 孝 二	(東京芝浦電気)	
	岡 久 雄	(三菱電機)	
	片 岡 昭 雄	(東京工業大学)	
	川 上 直 衛	(日立製作所)	
	北 村 覺 一	(中央大学)	
	佐 藤 則 明	(東京工業大学)	
	曾 根 悟	(東京大学)	
	難 波 江 章	(東京芝浦電気)	
	原 島 文 雄	(東京大学)	
	森 春 元	(富士電機製造)	
	渡 辺 德 行	(明電舎)	
译 者	孟庆宗	张业广	张良金
校 者	张秀澹	缪时轮	

目 录

第1章 整流器概述	17-1
1.1 整流器的发展过程	17-1
1.2 电压整流器	17-1
1.3 机械整流器	17-2
1.4 多晶半导体整流元件	17-2
1.5 单晶半导体整流元件和功率晶体管	17-3
1.6 整流器的功能	17-4
第2章 硅整流二极管	17-4
2.1 结构	17-4
2.2 特性和额定值	17-5
2.3 功率肖特基(Schottky)势垒二极管	17-7
第3章 晶闸管整流	17-8
3.1 结构和工作原理	17-8
3.2 特性和额定值	17-11
3.3 门极特性和门极电路	17-15
3.4 发热和冷却	17-16
第4章 特殊晶闸管和功率晶体管	17-17
4.1 双向三端晶闸管	17-17
4.2 双向二端晶闸管	17-18
4.3 可关断晶闸管	17-19
4.4 光控晶闸管	17-20
4.5 逆导晶闸管	17-20
4.6 功率晶体管	17-21
第5章 整流器电路	17-22
5.1 整流器电路概述	17-22
5.2 基本整流电路	17-23
5.3 重叠现象和电压降	17-26
5.4 整流电路的功率因数及谐波	17-27
5.5 整流变压器和平衡电抗器	17-29
5.6 各种整流电路主要特性的比较	17-32
5.7 特殊整流电路	17-32
5.8 外部换相逆变电路	17-32
5.9 周波变流器	17-33
第6章 直流调压和直流电机传动	17-36
6.1 直流开关及其应用	17-36
6.2 直流斩波电路	17-36
6.3 直流电机的斩波控制	17-38
6.4 静止列奥纳德(Leonard)装置	17-39
第7章 交流调压及其应用	17-43
7.1 交流开关和交流调功电路	17-43
7.2 电力方面的应用	17-46
7.3 电力传动方面的应用	17-47

7.4 电热方面的应用	17-47
7.5 家用电器方面的应用	17-48
7.6 其他方面的应用	17-48
第8章 自换相逆变器电路及其应用	17-49
8.1 逆变装置的种类及其应用	17-49
8.2 换相改进型非并联逆变器	17-49
8.3 换相电容器与反向偏置时间的关系	17-53
8.4 串联逆变器	17-54
8.5 逆变器的调压	17-55
8.6 输出波形的改善	17-56
8.7 异步电机的逆变器传动	17-58
8.8 同步电机的逆变器传动	17-62
第9章 无换向器电动机	17-63
9.1 无换向器电动机概述	17-63
9.2 无换向器电动机的结构	17-63
9.3 主要特性	17-65
9.4 控制方式	17-66
9.5 启动方法	17-67
第10章 晶闸管在其他方面的应用	17-67
10.1 稳压稳频(CVCF)装置(电子计算机用)	17-67
10.2 高频加热装置(感应加热)	17-69
10.3 超声波清洗机	17-69
10.4 静电除尘器	17-70
10.5 蓄电池充电器	17-70
10.6 励磁装置	17-71
10.7 底盘测功计	17-71
10.8 异步电动机的转子励磁调速	17-72
第11章 大容量晶闸管装置	17-74
11.1 装置结构上的注意事项	17-74
11.2 晶闸管的保护及保护	17-74
11.3 装置的保护方式	17-76
11.4 装置的结构	17-79
11.5 装置的大容量化	17-80
11.6 有关系统的问题	17-81
第12章 术语和标准	17-83
12.1 术语	17-83
12.2 变频器的标准	17-84
12.3 电力半导体元件的标准	17-87
12.4 电力半导体元件特性表	17-90
参考文献	17-93

第1章 整流器概述

1.1 整流器的发展过程

以电流只能在单方向流通的元件为主体的设备统称为整流器。出现这样含混不清的定义是由其历史沿革及其各种各样的应用研究所造成的。

最早的电力整流器是 Hewitt 发明的汞壳汞弧整流器(1902年)。由于 Schäfer 发展了铁壳汞弧整流器(1911年),加上勃朗·鲍威利(BBC)公司的努力,使电子式的大功率交直流变换才成为可能。那时,Langmuir 发表了等离子体理论,导致 Hull 发明热阴极三极管(1929年)。于是研究了相位控制的功能,并依靠这些总称为电弧整流器的设备,奠定了现在的电力电子技术的基础。

在汞弧整流器由多阳极到单阳极、由水冷到风冷、由抽气式到密封式的发展过程中,由于机械接触结构的整流器效率高而引人注目,于是出现了可以进行相位控制的接触式变流机,这也就是向低电压、大电流领域发展的时期。

另外,相对于只限于小功率的硒整流器等多晶半导体整流二极管,试制成采用单晶 pn 结的锗整流二极管(1956年),才使借助半导体元件进行大功率变换成为可能。接着,又发明了使用方便的硅整流二极管,除去为低压、高频领域研制的肖特基势垒二极管以外,大部分不可控整流器已为硅整流器所取代。

1956年贝尔(Bell)研究所的 Moll 等发表了信号电平用的 pnpn 开关;通用电气(GE)公司着眼于

电力应用而研制出可控硅整流元件(SCR)(1958年)。此后,将四层以上 pn 结构的电力元件统称为晶闸管(以下简称晶闸管——译者注)。晶闸管迅速向大功率、高速度的方向发展,基本上取代了维护麻烦的水弧整流器,又发明了交流控制用的三端交流开关和直流斩波器用的进导晶闸管等适用于不同目的的各种复合元件。另外,为了克服晶闸管不能依靠元件本身自行关断的弱点,也研制和应用了可关断晶闸管(GTO)和功率晶体管。

1.2 电弧整流器

1.2.1 汞弧整流器^{(1)~(4)}

在电极密封部位热条件许可范围内,水银池阴极的电流容量是不受限制的,汞弧整流器的优点是瞬时过载能力大。额定容量主要受逆弧限制,对于高压、大容量而言,温度控制是使用时的关键。除去高压应用外,可以设定逆弧几率大致是变换功率的函数。若控制温度过高,逆弧几率便会增高,过低则电回路狭窄部分的电流容量就要下降,并产生异常电压压降。因此,启动时应予以注意,在密封式汞弧整流管中,曾做过充惰性气体的尝试使之容易启动。

在多阳极汞弧整流器中,制成了 1500V、2000kW 的风冷式单筒整流器,其电压压降为 20~40V,控制恢复时间为 1~0.1ms。单阳极汞弧整流器,有靠引燃极在每个周期形成阴极辉点的引燃管和借助励弧极经常保持阴极辉点的励弧管。它们本来是为了适应大容量、高效率的要求而研制的,但小容量

表 1 额定值的种类及试验条件

额定值种类	试 验 条 件	主 要 用 途
A	额定输出连续,额定输出电流的150% 1分钟	电化工业用
B	额定输出连续,额定输出电流的125% 2小时,200% 1分钟	工业动力用
C	额定输出连续,额定输出电流的150% 2小时,200% 1分钟	电气铁道及矿山用
D	额定输出连续,额定输出电流的150% 2小时,300% 1分钟	电气铁道及矿山用
E	额定输出连续, (i) 额定输出电流的120% 2小时和 (ii) 额定输出 9 分钟, 额定输出电流的 300% 1 分钟重复10次	电气铁道用

引燃管被引入了电焊机的应用领域。表1给出普通汞弧变流装置额定值的种类及试验条件,为了使由热时间常数及额定控制条件等不相同的设备所构成的变流装置还适用于电气铁道的负载条件,该表B类是作了专门规定的额定值,而采用晶闸管变流装置时,不须作300%负载重复试验。

直流输电用的单筒四阳极式的100kV级高压汞弧整流器已在我国投入运行⁽⁵⁾⁽⁶⁾。在每个阳极筒体中大都安装有中间电极,四阳级并联连接的时候,要注意外部均压电路的设计⁽⁷⁾。

1.2.2 热阴极放电管⁽³⁾⁽⁴⁾ 热阴极放电管的电流大致受热阴极电子发射量的限制。此时,由于热阴极用具有和气体电离电压相当的阴极压降的离子罩罩住,即使形状复杂,但由整个表面发射出来的电子都有助于输出电流。对于超过发射量的电流,使阴极压降上升,促进阴极劣化,所以特别要注意起动时的预热。

充惰性气体的整流管反向耐压较低,一般为100~200V,用密封充入水银蒸汽的方法,制成了10kV的高压管,其电流多为10A。采用钍-钨阴极、充入1000Pa氙气的钨钨管,由于抑制了阴极材料的蒸发,温度能够提高,因此成为体积小、电流大而电弧压降低的整流管。

热阴极栅控放电管被称为闸流管,具有和单阳极汞弧整流器相同的功能。充氩闸流管是利用氧化物阴极在短至微秒的时间内释放大电流的能力,应用于雷达发射机的脉冲调制等。封入吸收大量氢气的钙,可制成即使在低压下也能防止气体消失的管子。

1.3 机械整流器⁽²⁾⁽⁸⁾

借助电磁铁使振子振动,从而使触点开闭,由低压直流电源通过变压器获得高压交流电的逆变器是最原始的,但它是一种有特殊用途的逆变装置。100W级装置的寿命可望达到1000小时。

作为低电压大电流直流电源,有一种是将24~36相变压器的多相接线端接至静止整流子,由同步旋转电刷输出直流的变压整流器,其输出为100V、1500A,效率达90%。还有,在氢气中的水银喷射时,进行同步开闭以改善电弧性能和提高寿命的水银喷射整流器,产品水平已达1200V、600A。

在多相连接电路中,当把汞弧整流器各阳极及

阴极间的阀作用运用到同步触头上时,在换相终止时,使换相用饱和电抗器去饱和,强制形成一个电流微小期间,在此期间内断开触头,这种工作方式是在四十年代发明的,被称为接触式变流机。在接触式变流机的触头上并接电容器等,以改善电弧性能。输出200~800V、100000A、效率97%的装置已在化学工业中广为使用。作为饱和电抗器的铁心材料,要求饱和特性陡、饱和磁通密度高,可使用卷成环形的铁-镍或铁-硅系各向异性的铁心。

1.4 多晶半导体整流元件

1.4.1 硒整流元件⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ 在表面粗糙的、厚度为1mm以下的铁片或铝片上镀镍,再镀钨上数十微米厚的硒层,进而喷镀锡、锡等易熔合金,进行热处理、电化成,成为以基片为阳极、易熔合金为阴极的整流元件。为了改善正、反向特性,添加适当的元素。不过,从根本上说,这是一种根据经验发展的制造方法。

根据pn异质结理论,该元件的整流作用原理是基于硒层的镍侧上形成的镍和硒的化合物层构成p⁺层,硒层构成p层,易熔合金侧上形成的锡和硒的化合物构成n⁺层。

硒整流元件因是多晶,所以损耗大,允许正向电流密度约为50mA/cm²,采用风冷可提高2倍,

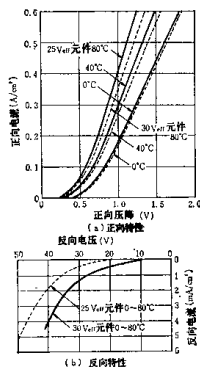


图1 硒整流元件的特性

但也不超过单晶元件的千分之一。反向耐压也在几十伏以下,允许温度为 85°C 。正、反向特性见图1,已制成极板面积为几至几百平方厘米的元件。

由于多晶元件与单晶元件相比体积大,故热时间常数和过载能力大。另外,即使耐压低的地方因过电压瞬时短路,由于过热部分只不过变成有绝缘性的非结晶形硒,具有自恢复特性,因而可作为高可靠性的元件使用。

1.4.2 其他多晶半导体元件 在 1000°C 下使铜片表面氧化,除去表面的 CuO 层,露出 Cu_2O 层,借电解还原在表面析出铜,喷镀易熔合金,形成电极,便得到氧化亚铜整流元件。与上述硒的情况相比,铜基片为阴极⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

氧化亚铜整流元件与硒整流元件相比,虽然允

许温度及反向耐压低,但正向电压降也低,有一个时期曾用于弱电领域的量测仪表及环形调制器。

利用镁或铝镁合金与 Cu_2S 层接触的硫化铜整流元件,允许温度为 200°C ,正向电流密度达安/厘米²,但反向耐压仅有2V,国外已研制成功该产品并用于蓄电池充电⁽¹⁴⁾。

1.5 单晶半导体整流元件和功率晶体管

已研制成采用锗单晶形成pn结的锗整流二极管,其电流密度为 $100\text{A}/\text{cm}^2$,正向电流达100A,反向耐压达400V,允许结温低为 65°C ,这些数据只是反映了硅整流管投入工业生产以前1955~1957年的制作水平⁽¹⁵⁾。

表2 电力单晶半导体元件的种类及符号

名 称	IEC 名称	符 号	伏安特性	最大容量(约)
半导体整流二极管	Semiconductor rectifier diode			3000V 4500A
肖特基势垒二极管	Schottky barrier diode			40V 60A (恢复时间100ns)
功率晶体管	Power transistor			500~300V 200~400A
结型场效应晶体管 (FET)	Field effect transistor			300V 5A
反向阻断三端晶闸管 (SCR)	Reverse blocking triode thyristor			4000~2500V 1000~1500A
三端交流开关 (TRIAC)	Bidirectional triode thyristor			1200V 300A(rms)
反向导电晶闸管	Reverse conducting triode thyristor			10000V 400A
反向导通晶闸管				2500V 正向: 400A 反向: 150A
可关断晶闸管 (GTO)	Turn off(triode) thyristor			1000V (试制) 200A
光控晶闸管 (LASCR)	Light activated triode thyristor			1000V (试制) 100A
肖克莱二极管 (pnpn开关)	PNPN-type switch Reverse blocking triode thyristor			130V 40A(10μs脉冲)
硅对称开关 (SSS)	Bidirectional diode thyristor			480V 50A(rms)

硅整流二极管的正向压降略高,但最高允许结温高达 150°C ,正在研制电流数千安、反向耐压 10000V 级的元件⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

研制了应用于不同领域的各种类型晶闸管,它们具有与闸流管栅控相当的门极控制功能⁽¹⁷⁾。各种电力单晶半导体元件的名称、符号及习称见表 2。

作为低压大电流整流二极管及快速恢复元件,功率肖特基势垒二极管的研制遇到了反向电流大的困难⁽¹⁸⁾。另外,已能制造数百伏数百安的功率晶体管,与此同时,结型场效应晶体管(FET)的工作

功率也有提高。

1.6 整流器的功能

电力变换定义为:在基本上没有功率损耗情况下,使电压、电流、频率、相数中一项或一项以上参数进行变换。借助采用表 2 所列各种类型功率元件的电子方法进行电力变换的装置统称为静止电力变流装置。

晶闸管的应用特别广泛,静止电力变流装置从功能上大致可按表 3 来分类。

表 3 静止电力变流装置的种类

名 称	IEC 名 称	简 要 定 义	备 注
(静止)整流装置	Rectifier	将交流电变为直流电	
(静止)逆变装置	Inverter	将直流电变为交流电	也可称为逆变器
(静止)可逆变流装置	Reversible (power) converter	电力流通方向可逆的变换	
(静止)变频器	Electronic frequency converter	将一种交流电变为另一种频率的交流电	不经交流环节而直接进行变换时,也称为周波变换器
(静止)直流变换器	Electronic d. c. converter	将一种直流电变为另一种电压的直流电	不经交流环节而直接进行变换时,也称为直流斩波器
交流调功器	a. c. power controller	借相位控制或频率控制直接调节交流功率	
(电力)电子开关	Electronic (power) switch	用电子方法将交流或直流电进行接通、分断的装置	直流斩波器的电子开关也称为斩波器器件 ⁽¹⁾

① 斩波器器件的图形为



第 2 章 硅整流二极管

2.1 结 构

以整流作用为目的而设计的硅二极管叫硅整流二极管。它是将带整流结的单晶硅整流管心封装在管壳中而制成的。

整流管心是将电阻率符合要求的硅单晶棒用金刚刀片切削成规定厚度的圆片,研磨至正确的厚度,再借助化学腐蚀去除表面层的硅片为基体做成

的。为改善整流特性,整流结通常做成 p^+pn 结、 pn^+n 结或 pin 结,如图 2 所示,它们是在低掺杂的 p 层、 n 层或 i 层两侧有高掺杂的 p^+ 层及 n^+ 层的双结结构。整流结用合金法和扩散法制造。外延生

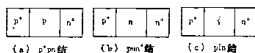


图 2 整流结

长法也可考虑使用,但仅限于特殊情况下采用。图3给出合金法示例。在高电阻率P型硅片一侧叠放金-钼合金片,另一侧叠放纯铝片(图(a)),将其置于真空中,在约800°C下加热,使硅的一部分熔化(图(b))。缓慢冷却,由于再结晶,钼侧变成p⁺层,另一侧掺锡变成n⁺层,制成pin结(图(c))。整流结片的厚度随耐压不同而异,在0.2~2mm之间,电流密度1~2A/mm²。在高压元件中,还将表面加工成斜角形状。

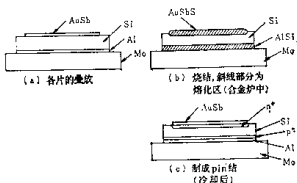


图3 合金法制造整流结

关于外壳,数安以下的元件采用引线管脚型。数安到数百安的元件一般采用螺栓型或平底型,一部分也采用压入型。数百安以上的元件采用平板型。其外形尺寸大小不一,不过正走向统一,国际电工委员会(IEC)已订有标准^①。引线管脚型是在整流管心两面焊上引线,用环氧树脂、玻璃或金属封装而成。压入型、平底型及螺栓型的内部结构大致相同。在轻工业用的小容量元件中,整流管心直接软焊在铜底座上。中等容量以上的元件若用软焊,由于铜和硅的热膨胀系数相差三倍以上,因通断电的热循环造成焊料热疲劳,就成为元件损坏的一个原因。为了避免这一点,在整流管心两面用热膨胀系数与硅接近的钨或钼支撑板,增加机械强度,并采用硬焊或不用焊料的压接结构。图4给出两种螺栓型结构,若在整流管心上施加数百至数千伏反向电压,就会在整流结表面出现 10^8 V/cm的强电场,若表面不能保持极清洁的状态,则有短路的危险。为此,在整流结表面涂敷硅橡胶、玻璃等表面钝化剂,并封装于真空或充满干燥氮气的外壳中。为了达到电气绝缘的目的,外壳上设置有玻璃绝缘子或陶瓷绝缘子。平板型元件如图5所示,由两侧加压,将用支撑板增强的整流管心与外壳连接起来,或是一侧为焊接,另一侧为压接的结构。

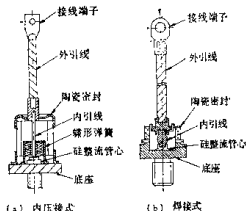


图4 螺栓型整流二极管的结构(例)

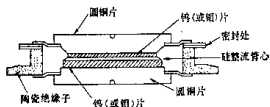


图5 平板压接型整流二极管的结构(例)

2.2 特性和额定值^{(20)~(22)}

硅整流二极管伏安特性和由理论得到的pn结伏安特性的比较见图6。在小电流范围内,正向电流与理论值相符,但在大电流范围内,由半导体电阻产生的电压降成为主要部分,正向电流如实线所示直线上升。反向电流比理论值大,其原因是由于存在表面漏电流和电子雪崩击穿。若反向击穿电压为 V_s ,反向饱和电流为 I_s ,施加的反向电压为 V ,则由电子雪崩效应引起的反向倍增电流可近似用经验公式 $I_s / \{1 - (V/V_s)^n\}$ 表示, n 在3~6之间。图7给出正向特性与温度关系的示例。在小电流范围内,当正向电流一定时,结温上升,正向压降就减少。其温度系数近似为 -2 mV/°C。反向电流

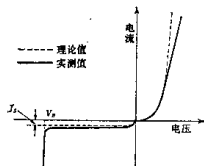


图6 伏安特性曲线

① 原文误为2 mV/°C。——译者注

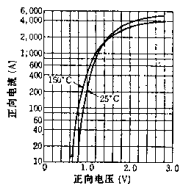
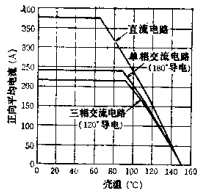
图7 硅整流二极管的正向特性(例)
(元件额定正向平均电流800 A)

图8 电流温度特性曲线(例)

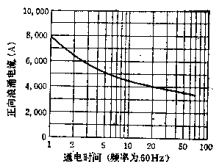


图9 400 A 4000 V 整流二极管的额定正向浪涌电流(例)

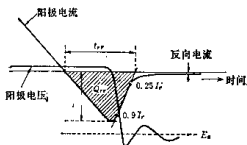
随结温上升而增大，结温上升 $\Delta\theta(^{\circ}\text{C})$ ，反向电流增加 $(e^{b\Delta\theta} - 1)$ 倍左右，式中的 b 约为 $0.15^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

整流二极管的电气额定值及特性以壳温或环境温度为基准来表示。风冷时除环境温度外还要规定风速。一般，作为电气额定值给出的有：反向重复峰值电压、反向不重复峰值电压、正向平均电流、电流-温度特性曲线、正向过载电流、正向浪涌电流等。但作为电气特性给出的有：正向峰值电压降、反向峰值电流等。作为温度额定值给出最高结温，但作为温度特性给出热阻及瞬态热阻抗。平均正向电流给出的是正弦半波电流在一个周期内的平均值。图8给出电流温度特性曲线的示例。正向过载电流根据最高结温及瞬态热阻抗来计算。最高结温以结构材料不受损伤，反向电压保持不变等为条件，由元件制造厂规定，其值一般在 $140\sim 220^{\circ}\text{C}$ 之间。浪涌电流是用连续通以额定正向平均电流后，所施加的连续的不出现故障的工频正弦半波电流峰值和时间(周波数)的关系来表示(图9)。在半周以内短时间的情况下，不规定电流波形，而给出流过的正向电流的平方对时间积分 I^2t 的允许值，单位为 $\text{A}^2\cdot\text{s}$ 。整流结和管壳之间的热阻 R_{th} 按下式定义： $R_{th} = (T_j - T_c) / P (^{\circ}\text{C}/\text{W})$ 。式中 T_j ：结温； T_c ：壳温； P ：损耗。工作时的结温不能直接测定，不过可由壳温及正向电流损耗的计算值借 R_{th} 推算出来。除此以外，还给出机械特性。典型的整流二极管规格示例见表4。

整流二极管动态特性有反向恢复特性。在通以正向电流的元件上施加反向电压时，在短时间失去反向阻断能力，就会流过大的反向电流。从加反向电压起至恢复阻断能力止所需的时间叫反向恢复时间 t_{rr} 。此时的电压电流关系见图10。把 t_{rr} 期间

表4 螺栓型硅整流二极管规格示例

反向重复峰值电压	4000 V
反向不重复峰值电压	4300 V
正向平均电流	400 A
正向浪涌电流(60 Hz 正弦半波 1 个周波)	8000 A
I^2t 值	$2.65 \times 10^6 \text{ A}^2\cdot\text{s}$
反向电流($T_j = 150^{\circ}\text{C}$, 2500 V)	$< 30 \text{ mA}$
正向电压降($T_c = 25^{\circ}\text{C}$, 5000 A)	$< 1.8 \text{ V}$
热阻	$< 0.09^{\circ}\text{C}/\text{W}$
最高结温	150°C
存放温度	$-40\sim 150^{\circ}\text{C}$
安装力矩	$500\sim 560 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

图10 硅整流二极管的反向恢复特性
[$Q_{rr} \approx (1/2) I_{F, t_{rr}}$]

内流过的电流对时间的积分称为反向恢复电荷 Q_{rr} 。因反向电流变化率非常大，由于电路电感的存在，会发生反向电压超过电路电压 E_c 的情况。另外，在元件串联使用时，必须注意到 Q_{rr} 的不同， Q_{rr} 小的元件恢复得快，全部电压将加在该元件上。可借助浪涌吸收电路或电容分压逐予以保护。

若即将硅整流结片表面加工成斜角状(见3.1

节)等方法,以减弱结的表面电场强度,并将体内耐压设计得比表面耐压低,则结内电子雪崩击穿均匀发生,允许有较大的反向损耗。

在这种元件中,有雪崩整流二极管及可控雪崩整流二极管。后者是为固定使用在击穿范围内而设计的,给出击穿电压的最大值和最小值。前者仅仅给出击穿电压的最小值。此外,两者都将反向浪涌功率作为额定值给出^[21]。

关于冷却将在3.4节里集中叙述。

2.3 功率肖特基(Schottky)

势垒二极管⁽¹⁸⁾(28)

2.3.1 概述 肖特基势垒二极管没有pn结型元件的少数载流子积蓄效应,反向恢复快,是作为高频讯号用元件而研制的。已制成正向电压0.5V、电流25~35A、反向耐压30V的大面积元件供应市场。反向恢复时间为200ns的元件,在200kHz下使用也不必降低其额定值。另外,虽正向损耗小,但存在反向电流大,反向耐压低的缺点。

2.3.2 结构和原理 功率元件结构示意图见图11。在基片一侧蒸镀上铝或铬等势垒用金属,以获得整流接触;在另一侧蒸镀上金或银等以构成欧姆接触,并分别形成阳极及阴极。

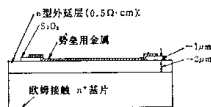


图11 结构示意图

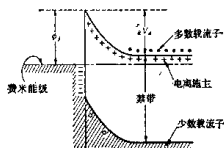


图12 热平衡状态下的肖特基势垒区

ϕ_B : 势垒高度 V_d : 扩散电位差

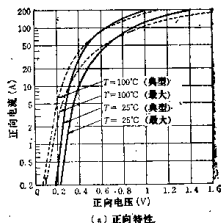
图12给出热平衡时势垒区的能带图。当用铝及n型硅时,势垒的高度约为0.69eV,即使在室温下,也有热电子由金属向半导体释放,它与由半导体向金属扩散的电子流达到平衡,于是在耗尽层内产生扩散电位差。正向偏置下,扩散电子流占优势,形成正向电流;反向偏置下,释放的热电子形成反向电流。伏安特性形式上与pn结的相同,但反向饱和电流比pn结大得多。反向饱和电流为

$$I_s = AT^2 \exp(-\phi_B/kT) \quad (1)$$

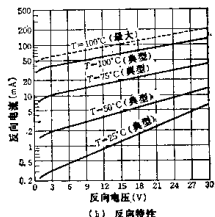
式中 T : 温度; k : 玻耳兹曼常数; $A \approx 1.2 \times 10^6 (\text{A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2})$ 。

2.3.3 特性 式(1)给出的反向饱和电流数值大这一事实意味着,在与pn结型元件相同程度的电流密度下,它将是一种正向压降低、损耗小的元件。另一方面,由于温度上升, I_s 急剧增大,所以势垒区的最高允许温度一般限制在100°C。

图13给出30A元件的正、反向特性示例。



(a) 正向特性



(b) 反向特性

图13 功率肖特基势垒二极管的伏安特性示例

第3章 晶体闸流管

3.1 结构和工作原理

本章叙述过去称为可控硅整流元件 (SCR) 的 P 门极反向阻断三端晶体闸流管 (简称为晶闸管)。

(a) 外形 图 14 给出晶闸管的外形。数安以下的小容量元件一般制成引线脚型。数安到数百安的元件大部分为螺栓型, 一部分也制成压入型、平底型。容量再大的元件为平板型。

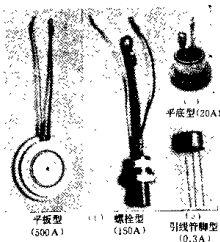


图14 晶闸管的外形图例 (a)

(b) 工作原理 晶闸管的基本结构见图 15 (a)。它是硅单晶为基片的 pnpn 四层结构, 阳极 A 连接至外侧的 P 层, 阴极 K 连接至外侧的 n 层, 称为门极的第三个电极 G 连接至内侧的 P 层。以阴极为参考点的阳极特性见图 16。若门极无电流流过, 即使加上正向电压, 晶闸管仍处于只有很少一点电流流过的断态。但是, 电压进一步提高, 则电流急剧增大。一旦电压达到转折电压, 立刻呈现负阻特性, 转向通态。若门极流过如图 17 所示的正向电流, 则转折电压的数值依次减少, 门极电流足够大时, 呈现的特性与普通整流二极管的正向几乎没有差别, 从而, 能够借助足够大的门极电流使晶闸管开通。但是, 一旦开通, 门极即失去控制能力, 电流仅由外部电路限制。为使晶闸管关断, 必须将电流降至维持电流以下或施加一持续时间比电路换相关断时间长的反向电压。至于反向, 如图 15 所示, 与普通整流二极管几乎没有差别。如图 15

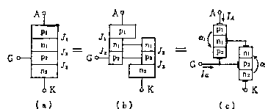


图15 晶闸管的基本结构 (a) 及其等效电路 (b) (c)

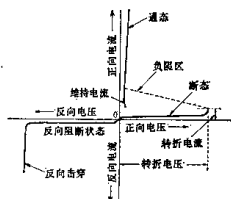


图16 晶闸管的阳极特性 (门极电流为零时)

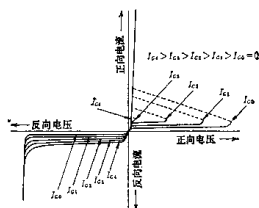


图17 门极电流变化时的阳极特性

(b) 所示, 可以认为 pnpn 结构是由晶体管 $p_1n_1p_2$ 与晶体管 $n_1p_2n_3$ 组合起来的。正向偏置的晶闸管与图 15(c) 所示的两个晶体管相似。

如设阳极电流为 I_A 、门极电流为 I_G 、中间结 J_2 的漏电流为 I_c 、晶体管 $p_1n_1p_2$ 的电流放大系数为 α_1 、晶体管 $n_1p_2n_3$ 的电流放大系数为 α_2 , 则下式成立⁽²⁴⁾:

$$I_A = (\alpha_2 I_G + I_c) / \{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)\} \quad (2)$$

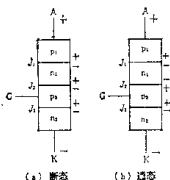
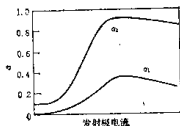
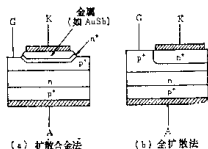
图18 结 J_2 的偏置状态图19 α 与电流关系的模型图

图20 管心的制造方法

$\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ 时，如图 18(a) 所示，结 J_2 为反向偏置，处于维持高阻抗的阻断状态。若注入比、输运系数及电流倍增系数分别用 γ 、 β 及 M 表示，则 $\alpha_1 = \gamma_1 \beta_1 M$ ， $\alpha_2 = \gamma_2 \beta_2 M$ 。另外，若结 J_2 电子雪崩击穿电压为 V_s ，施加电压为 V ， $n = 3 \sim 6$ ，则 M 用下式表示：

$$M = 1 / \{1 - (V/V_s)^n\} \quad (3)$$

$(\alpha_1 + \alpha_2) = (\gamma_1 \beta_1 + \gamma_2 \beta_2) M$ ，阻断电压一定， I_a 增加时， $\gamma_1 \beta_1$ 及 $\gamma_2 \beta_2$ 增大，使得 $(\alpha_1 + \alpha_2) \rightarrow 1$ ，引起导通。图 19 给出 α 与电流关系的示例。另外，提高阻断电压时， M 及 β 增大，引起转折。若 $(\alpha_1 + \alpha_2) \rightarrow 1$ 时对应的转折电压为 V_{so} ，则其值可由 $(\gamma_1 \beta_1 + \gamma_2 \beta_2) M = 1$ 及式 (2)、(3) 导出如下：

$$V_{so} = V_s \{1 - (\gamma_1 \beta_1 + \gamma_2 \beta_2)^{1/n}\} \quad (4)$$

对于耐压由穿通现象决定的晶闸管，由于阻断电压提高， β 显著增大， V_{so} 的值就比 V_s 小得多。但是，即使电压增加， β_1 变化不大时，则 V_{so} 的值非常接近 V_s 。大功率晶闸管多属后者。由于在通态下，如图 20(b) 所示，结 J_2 为正向偏置，三个结中有两个结的电压降相互抵消，所以通态电压与普通整流二极管的正向电压大小相当。晶闸管的反向击穿电压由结 J_1 的电子雪崩击穿电压及 n_2 区穿通电压中数值小的那个电压决定。

(c) 制造方法 pnpn 结构一般采用扩散合金法或全扩散法制造，小元件的批量生产可采用平面扩散法^[25]。外延生长法也可采用，不过仅限于特殊场合采用。另外，离子注入法也可以考虑使用。

由于晶闸管的耐压受 n 型基区杂质浓度及厚度的影响，制造时，首先要选择作为基片的 n 型硅片的电阻率及厚度。在片子两侧扩散 p 型杂质，形成 pnp 结构。在其一面 p 型区上制作 n 型区，用合金法形成 n 型区的叫扩散合金法，用扩散法形成 n 型

区的叫全扩散法（见图 20）。接着，在 pnpn 结构中在 p 型区上制作欧姆接触并装上门极引线，制成管心。由于硅表面极为活泼，为了使其钝化，要涂敷绝缘漆、硅橡胶、玻璃等表面钝化剂，并进行烘烤。管心与铜底座联结时，对数安以下的小功率元件采用低熔点软焊料直接焊接。因铜的热膨胀系数为硅的三倍多，会产生应力，但它被软焊料吸收，并不引起损坏。这不仅能提高传热效果，并有成本低的优点。轻工业用元件和重工业用元件的比较见表 5。

表 5 重工业用及轻工业用元件的比较

	重工业用	轻工业用
结片增强支撑板	有	无
结片形状	圆形，多为斜角结构	多边形
批量生产	不适宜	适宜
最高电压(V)	~4000	最大 500
电流(A)	~1500	最大 20

大功率元件若采用软焊，重复过载所加的热循环就成为焊料热疲劳而使元件损坏的原因^[26]。另外，若直接用硬焊联结，因热膨胀系数不同使硅片遭受应力而产生裂缝。为避免这一点，结片上“贴”有热膨胀系数与硅接近的钨或钨支撑板，以增强其机械性能，再用硬焊联结或加压接触。图 21 给出管心截面的示例。为了使与表面钝化剂接触的气氛保持在规定的条件下，不受外界影响，管心封装于真空或充满干燥氮气或氩气的外壳中。封装时，为确保电气绝缘，大型元件采用陶瓷绝缘了，小型元件采用玻璃绝缘了。图 22 给出螺栓型晶闸管的结构示例。螺栓型元件内部产生的热量，约有 90~95% 经由下面的铜底座散逸。而平板型是为了减少热阻而采用能从管心两侧散热的结构^[27]。和管心尺寸相

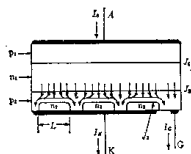


图27 短路发射极结构

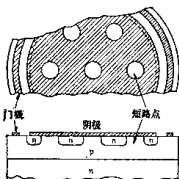


图28 多点短路发射极结构

流范围内的注入比设计得低一些，则高温特性及断态电压临界上升率都会得到改善。短路发射极结构使阴极有效面积减少的只是短路点那一部分。为了尽量减少这部分损失，并且得到同样的短路效果，大面积晶闸管采用如图28所示的多点短路发射极结构。

3.2 特性和额定值

(a) 概述 晶闸管有两种额定值，一种是以环境温度为参考点，另一种是以管壳温度为参考点。给出的电气额定值有：反向重复峰值电压、反向不重复峰值电压、断态重复峰值电压、断态不重复峰值电压、直流断态电压、通态平均电流、通态过载电流、通态浪涌电流、通态电流临界上升率、门极反向峰值电压、门极正向峰值电压、门极正向峰值电流、门极峰值损耗、门极平均损耗等。给出的电气特性有：通态特性、最大反向电流、最大反向恢复电荷、最大断态电流、最大维持电流、最大擎住电流、最小断态电压临界上升率、最大开通时间、最大电路换相关断时间、最大门极触发电压、最大门极触发电流、最小门极不触发电压、最小门极不触发电流、最大门极反向电流、最大通态损耗特性、通态平均电流极限值、门极有关的极限值及特性等。

另外，温度额定值给出的有（视在）结温及存放温度，而温度特性给出的有最大热阻、最大瞬态热阻抗等。此外，还规定了机械强度⁽³⁰⁾。

(b) 反向电流和断态电流 门极电流为零，以结温为参变量的阳极特性见图29。反向电流和断态电流呈 ae^{bT} 形式，其中 a 、 b 为常数， T 为绝对温度。温度每上升 10°C ，反向电流及断态电流约增加一倍。

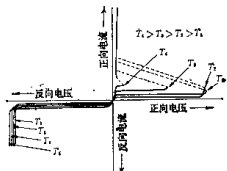


图29 温度对阳极特性的影响

应该避免晶闸管的门极在导通期间以外的时间内流通正向电流。然而，由于电路条件，会使反向阻断状态下门极有正向电流流过。在这种情况下，反向电流急剧增加，而且其值相当分散。在晶闸管串联时，要注意由此而引起的均压恶化⁽³¹⁾。

(c) 额定结温和转折电压 如上节式(4)所示， V_{so} 受到 V_s 及 $(\gamma_1\beta_1 + \gamma_2\beta_2)$ 的影响。由于温度上升，断态电流按指数曲线上升， $(\gamma_1\beta_1 + \gamma_2\beta_2)$ 逐渐增大接近1。另一方面， V_s 随温度上升也略有增加，其结果如图30所示，当温度上升至某一值时，则转折电压迅速下降。额定结温规定为转折电压不下降时的那个温度。其值一般为 125°C 。采用前而所述的短路发射极结构，转折电压的温度特性能得到显著的改善⁽³²⁾。

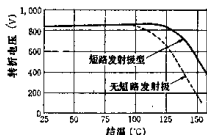


图30 转折电压与温度的关系

(d) 通态特性 图31给出通态特性的示例。通态电压 v_T 和通态电流 i_T 之间的关系由下式给

出:

$$v_T = (n k T / q) \log_e (K_1 i_T) + K_2 \sqrt{i_T} + R i_T$$

式中 K_1 、 K_2 、 R : 常数; k : 玻耳兹曼常数
 T : 绝对温度; q : 电子电荷; n : 1~2。

在一般工作电流下, 第一项是主要的, 第二项稍有影响, 第三项可以忽略。随着电流上升, 第二、三项变大, 在象浪涌电流那样大的电流范围内, 第三项成为主要部分⁽³²⁾。

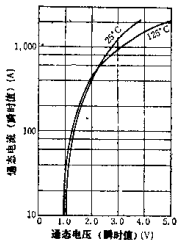


图31 通态特性 (例)
 (元件额定通态平均电流100 A)

(c) 功率损耗 结处引起的损耗有: 通态损耗(通态电流引起的)、断态时由断态电流引起的损耗、在反向阻断状态时由反向电流引起的损耗、由门极信号引起的门极损耗、开通损耗、关断损耗等。但是, 在一般工作状态下以通态损耗为主, 其余的可以忽略。另外, 在波形非常陡峭的电流或高频下工作时, 必须考虑开通损耗。有关这方面的内容将在(k)项中叙述。通态平均损耗及通态平均电流之间的关系可由阳极特性求得。其示例如图32所示。

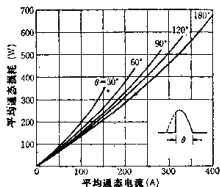


图32 通态平均损耗特性 (例)
 (元件额定通态平均电流400 A, 50 Hz)

(f) 热阻和瞬态热阻抗 由通态损耗造成的热分布是很复杂的。假设有一个结在结, 由于认为热集中地产生在该结上, 所以热的处理就非常简单了。图33示出此时的等效热路。在晶闸管上施加一阶梯状的功率损耗时, t 秒后, (结) 的温升被所加的功率除, 所得的商 $Z_{th}(t)$ (°C/W) 叫瞬态热阻抗。图34给出瞬态热阻抗的示例。当结的功率损耗为 $P(t)$ 时, 结相对于参考点的温升 $\Delta T(t)$ 用下式表示⁽³⁴⁾:

$$\Delta T(t) = P(0) Z_{th}(t) + \int_0^t Z_{th}(t-\tau) \left\{ \partial P(\tau) / \partial \tau \right\} d\tau \quad (5)$$

$t \rightarrow \infty$ 时, $Z_{th}(t)$ 的极限就是稳态热阻。

在热稳定状态下, 若平均结温为 T_j (°C)、壳温为 T_c (°C)、结的平均功率损耗为 P (W), 则结-壳间的热阻 R_{th} (°C/W) 由下式定义:

$$T_j - T_c = P R_{th} \quad (6)$$

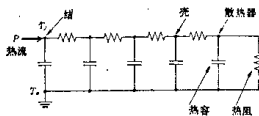


图33 等效热路 (结-冷却介质之间)
 (T_j : 结温 T_c : 冷却介质温度)

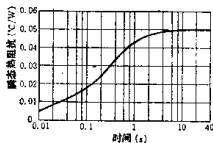


图34 结-壳间的瞬态热阻抗 (例)
 (400 A 平板型元件 $R_{th} = 0.05$ °C/W)

(g) 通态电流额定值 额定通态平均电流给出的是连续流通的工频正弦半波电流在一周内的平均值。由于 T_j 及 R_{th} 由元件本身决定, 若决定了 T_c , 由式(6)即可决定平均功率损耗的允许极限值。由它和通态平均损耗特性就能够求出通态平均电流的极限值。图35给出其示例。另外, 对于任何间歇负载的通态过载电流, 能够借助额定结温及瞬态热阻抗的计算求得。图36给出额定通态浪涌电

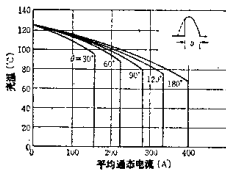


图35 通态平均电流的极限值
(元件额定通态平均电流400 A)

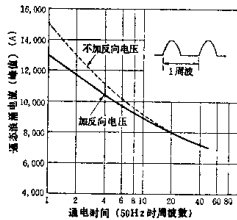


图36 额定通态浪涌电流(例)
(800 A、1200 V 元件)

流的示例,用工频正弦半波电流的峰值和周波数之间的关系表示。比一周的半波短但比一毫秒长的通态浪涌电流额定值用 $I_{2t} \left(= \sqrt{\int_0^t i_T^2 dt} \right) (A^{1/2} \cdot s)$ 表示。

(h) 耐压 在大功率晶闸管上施加电压时,直接引起元件损坏危险的有反向重复电压及反向不重复电压。电力晶闸管差不多都制成雪崩型的。不过,考虑到脉冲宽度,反向允许功率损耗却出人意料地低,电力设备中产生的操作浪涌过电压频率低、能量大,所以一定要有保护装置,而且反向工作电压必须留有足够的裕量。由断态电压及断态电压上升率过大引起转折时,转折本身导致损坏的现象大概不可能发生,问题是转折后加什么样的负载。再有,由于正向转折特性,有时在额定值项目中,也将断态不重复峰值电压略去。

(i) 维持电流及擎住电流 晶闸管变成通态之后,能够维持这一状态的电流临界值叫维持电流,擎住电流是导通瞬间能够维持通态的电流临界值。由于处于整个结面流过电流的状态,维持电流

为由结面内最容易保持电流流通部分所决定的临界电流。导通初期,仅门极附近部分导通,所以擎住电流的值比维持电流大。在阻抗特别高的电路中,擎住电流是晶闸管触发时必须考虑的参量。

(j) 开通时间 若晶闸管的门极流过正向电流,则结 J_1 注入的电子增多。这些电子经过时间 t_1 抵达结 J_1 并扩散至 n_1 区。 n_1 区电子浓度增大,则结 J_1 的正向偏置加大,由 J_1 向 n_1 注入的空穴增加。这些空穴经过时间 t_2 抵达 J_2 并扩散至 p_2 区,使 J_2 的电子注入增加。周而复始,阳极电流增大,引起导通。取 p_2 区的宽度为 W_{p2} 、 n_1 区的宽度为 W_{n1} 、电子扩散系数为 D_n 、空穴扩散系数为 D_p ,则有 $t_1 = W_{p2}^2 / (2D_n)$, $t_2 = W_{n1}^2 / (2D_p)$ 。下面提到的延迟时间的最小值为 $(t_1 + t_2)$ 。图 37 给出施加门极信号后的导通过程。由门极电流 10% 的时刻起到断态电压减少至初始值 90% 止的时间叫延迟时间 t_d ,断态电压由 90% 减小至 10% 所需要的时间叫上升时间 t_r 。开通时间定义为 $t_{on} = t_d + t_r$ 。它与门极电流、阳极电流等有关,其值一般为几微秒。

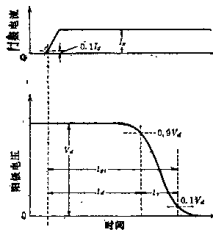


图37 导通特性

(k) 通态电流临界上升率 即使达到开通时间,正个结也不一定全面导通。门极触发时, p_2 区横向电阻使门极电流集中于门极附近,因此,远离门极处的电流随之急剧减小。如图 38 所示,开始是门极附近的点导通,然后导通区域逐渐扩大^[14]。扩展速度的快慢受门极电流大小、门极结构等影响。刚导通时,由于阳极电流集中在门极附近,若电流上升过快,会引起局部温升过高,或造成元件损坏,或对阻断电压及门极灵敏度有所影响而引起误动作。为了避免这一点,必须限制开通时的通态电流上升率。这个允许极限叫做通态电流临界上升率 di/dt 。

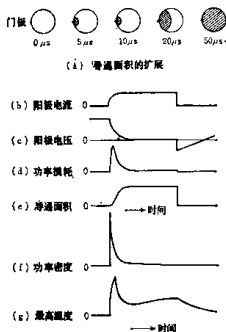


图38 门极导通特性

开通期间及导通区域扩展期间的功率损耗叫开通损耗。在400 Hz以下时,与通态损耗相比,它是可以略去不计的,但是当频率进一步提高时,它在全部功率损耗中就会占有相当大的比例。因此,对于晶闸管的高频电流额定值,必须予以特殊的考虑(55)(56)(57)。

大功率元件及快速元件要求 di/dt 大,故发展了特殊的门极结构。图39给出几种门极结构。图(b)、

(c)所示结构加大了门极-阴极间的周界长度,增大了初始导通区域。图(d)叫引进电场(FI)门极,是一种借助门极附近首先导通,利用它的主电流在电阻层上产生的电压降使其它部分同时导通的

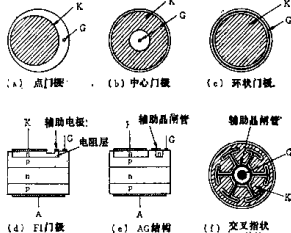


图39 各种门极结构

结构。图(e)叫放大门极(AG)结构,是一种借助门极信号使辅助晶闸管导通,以辅助晶闸管的主电流作为二次门极电流使阴极导通的结构。图(f)所示的结构既有AG结构,同时又增大了门极-阴极的周界长度。

(1) 断态电压临界上升率 如图40所示,给晶闸管施加快速上升的正向电压的情况可用两个晶体管模拟。若给结 J_2 上施加的电压 V_{J2} 有所变化,则流经 J_2 结电容 C_{J2} 的充电电流 i_{d1s} 为

$$i_{d1s} = V_{J2} dC_{J2}/dt + C_{J2} dV_{J2}/dt$$

充电电流流经两个晶体管的发射结。 V_{J2} 上升得快,则 i_{d1s} 就大,从而使 α_1 及 α_2 增大,假若 $\alpha_1 + \alpha_2 \rightarrow 1$, 则引起导通。不引起触发的极限电压上升率叫断态电压临界上升率 dV/dt 。改善它的最有效方法就是采用短路发射极结构。

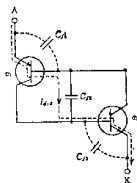
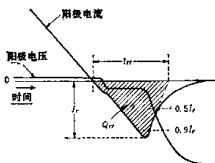


图40 考虑结电容的晶体管模拟

(m) 反向恢复特性 若有通态电流流过的晶闸管上施加反向电压,短时间内不呈现反向阻断能力,就会流过较大的反向电流。达到恢复反向阻断能力的时间 t_{rr} 叫反向恢复时间,在这个期间内,流通的电流对时间的积分被称为反向恢复电荷 Q_{rr} (见图41)。在研讨反向浪涌电压抑制或串联晶闸管瞬时反向电压均压时,这是一个必须知道的参量。

图41 反向恢复特性典型图
($Q_{rr} \approx (1/2) I_r t_{rr}$)

(n) 电路换相关断时间 在有通态电流流过的晶闸管上施加反向电压, 反向阻断能力恢复之后, n_1 区内积蓄的过剩少数载流子复合逐渐消失, 直至它们全部消失时, 正向阻断能力才得以恢复。恢复正向阻断能力所需要的时间叫关断时间⁽³⁵⁾。如图 42 所示, 关断时间定义为: 从阳极电流减小至零的时间起, 到再施加正向电压也不再返回到通态而能转入断态时刻止所需的最小时间。它受主电路、门极电路等许多条件的影响。例如, 结温的上升、通态峰值电流的增大、通态电流下降率的增大、反向恢复电流的减小、反向电压的减小、再施加电压上升率的增加、断态峰值电压的增大等, 都会使关断时间增加。由于关断时间正比于少子寿命, 为了缩短关断时间, 在快速元件中, 发展了金扩散技术。

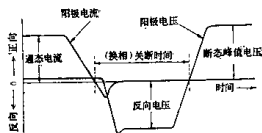


图 42 电路换相关断时间及阳极电压电流波形

当流过脉宽为几微秒以下的脉冲电流时, 元件处于局部导通状态, 由于局部温升变高, 关断时间变长。称这时的关断时间为脉冲关断时间。它与普通关断时间的比值为 IF (interdynamic factor), 可用它来判断是否适合作为快速晶闸管。这个值越接近 1 越适宜于作快速晶闸管⁽³⁶⁾。

(o) 普通晶闸管和快速晶闸管 电力晶闸管要求高电压化、大电流化、高速化等。在显著影响元件性能的因素中, 有发射极结面积、 n 型基区的厚度和电阻率以及少子寿命等。它们和主要特性之间的关系见表 6。特性上有许多互为矛盾之处, 故要同时满足各项特性要求是困难的。例如, 为了高速化, 要缩短关断时间, 必须降低少子寿命。另一方面, 为了高压化, 必须提高 n 基区电阻率并增加厚度。在这种情况下, 为了降低通态电压, 又必须增加少子寿命。如此看来, 高压化与快速化所要求的结构颇为不同。其结果发展了两种结构大不相同的晶闸管: 一种主要是用于逆变器以快速化为目标快速晶闸管; 另一种是旨在高压化、大电流化的

表 6 结构与特性之间的关系

特性参数值	电 流	电 压	关 断	承 受 dv/dt 能力	承 受 di/dt 能力
结构参数值	额定值	额定值	时间		
结面积	↑				↓
基区宽度	↓	↑	↑	↑	↓
电阻率	↓	↑			↓
少子寿命	↑	↑	↑	↓	↑
斜角结构	↓	↑			
短路发射极	↓	↑		↑	
改进的门极结构	↓				↑
热 阻	↓	↑	↑	↓	↓

注: ↑: 结构参数值增加, 特性参数值增加。

↓: 结构参数值增加, 特性参数值减小。

普通晶闸管。

3.3 门极特性和门极电路

(a) 门极触发特性 图 43 给出门极特性和极限值的示例。斜线部分表示门极触发电流、电压的分布范围。为了可靠触发, 由门极电源空载输出电压 E_g 和门极电路电阻 R 决定的负载线 AB 必须进入 $A_1A_2C_1B_1B_2P_1P_2$ 的范围内。由于触发特性与阳极电压有关, 一般给出的是断态电压为 6 或 12V 时的值。另外, 它也受温度的影响, 温度越低, 触发特性越不一致。

为了加快导通电流扩展速度, 减少开通损耗, 希望使用脉冲信号触发, 且要求门极电流尽可能大。图 44 给出触发所用的脉冲电流宽度及幅值的范围示例。希望门极脉冲上升得尽可能快。

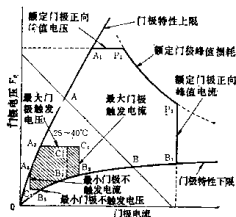


图 43 门极特性的表示