

《国外机械工业基本情况》参考资料

整 流 器

西 安 整 流 器 研 究 所 编

第 一 机 械 工 业 部 情 报 所

出版说明

在毛主席无产阶级革命路线指引下，在党的十大精神鼓舞下，我国机械工业形势一派大好。广大革命职工，高举毛泽东思想伟大红旗，深入开展批林批孔运动，狠抓革命猛促生产，巩固和发展了无产阶级文化大革命的丰硕成果，毛主席关于“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平”的伟大号召，正在胜利地实现。

“知彼知己，百战不殆”。为了了解国外机械工业基本情况，我们组织有关单位，按机械工业各行各业分别编写出版一套《国外机械工业基本情况》参考资料。

毛主席教导我们：“……一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。”资本主义、修正主义国家的东西，必然打上资本主义社会的烙印和带有资产阶级的阶级偏见。因此，在参考国外情况的过程中，必须遵照伟大领袖毛主席的教导，采取分析、批判的态度。

本册为整流器国外基本情况部分，编写的单位为西安整流器研究所。

由于我们水平有限，编辑工作中定有不少缺点和错误，请读者批评指正。

第一机械工业部情报所

一九七四年

目 录

一、整流器的基本情况	1
(一) 发展简史	1
(二) 各种整流器的简介	2
(三) 各种整流器的比较	5
二、可控硅整流元件的基本情况	7
(一) 可控硅整流元件的发展简史	7
(二) 可控硅元件的简介	7
(三) 可控硅元件制造技术的发展概况	9
(四) 可控硅元件的生产概况	12
(五) 可控硅元件的可靠性	14
(六) 可控硅元件的价格	15
(七) 可控硅派生元件的发展概况	16
(八) 硅功率器件制造工艺的发展动向	18
三、可控硅元件应用的基本情况	21
(一) 矿业	21
(二) 钢铁工业	22
(三) 交通运输	23
(四) 电解工业	23
(五) 机电工业	24
(六) 电源	24
(七) 直流输电	24
四、生产整流器的企业情况	26
(一) 英国	26
(二) 日本	26

一、整流器的基本况

(一) 发展简史

电力工业发展的初期，直流电是唯一的形式。当时电站容量不大，供电范围很小，只能供电站附近区域内的用电，在这种情况下，直流电还能满足要求。随着电力工业的发展，不仅扩大了电力生产，而且要求远距离输电，但制造大型高压直流发电机有结构上的困难，且直流升压和降压不方便又不宜于远距离输送，所以直流电在发电和输电方面都遇到了很大的困难。另一方面，由于交流发电机比直流发电机结构简单，容量可做得很大，且交流电可利用变压器方便地变压，适于远距离输送，因而在与直流电的竞争中占优势。假取得决定性胜利是在后来发明了感应电动机、三相交流制和三相变压器的时候。1891年苏联建立了世界上第一条长175公里，电压15000伏的三相输电线之后，交流输电就占了主导地位，交流电的应用也逐渐占了上风。尽管如此，在很多情况下，仍需使用直流电，直流电是必不可少的，对某些工艺过程，如电镀、电解、蓄电池充电等；另外直流电动机比交流电动机调速范围广而平滑，因而广泛用于电气化运输，金属轧制等方面。此外，无线电设备也需用直流电，虽容量小，但也十分重要。

因此，直流电在电能应用方面仍很重要，且用电量可观（如一个金属冶炼厂直流电的消耗量占全部用电量的30~40%）。

把由电站输送来的交流电变成直流电的设备就是变流装置。当然变流还包括从直流到交流（逆变）和从交流到另一频率的交流的变换。

十九世纪初期，普遍采用电动机发电机组的直流供电方式，它是用交流电驱动交流电动机，再带动直流发电机，以直流发电机输出的直流电去驱动用电设备的直流电动机或给直流电器供电。电动发电机组有许多优点，如能在极广的范围内平滑地调整输出直流电压的大小，运行稳定可靠，从而得到广泛应用。

此外，还有一种机械式的整流器，即把交流电直接变成直流电的旋转变流机，供给它交流电而输出直流电。不过它只适用于电压很高、电流很小的场合，如作为高压静电装置的电源。

四十年代初，德国制造了一种机械变流器——接触式变流器，可输出相当大的电流（几千安培），但工作电压较低，只有200~300伏。它的优点是效率高（达99.5%），缺点是频繁的开关，触头必须周期清洗和时常更换，维护工作十分繁重，且消耗供电网络中的无功功率。

1901年美国发明了具有水银阴极的离子管——水银整流管，它是最早而有代表性的的强电整流元件，后来在水银整流管的阴极、阳极间引入一个控制栅极，有效地解决了大功率整流器的控制，因而采用水银整流器的变流装置有了很大的发展。二十年代水银整流器开始用于城市电车的变电所以及电气化铁道、地铁等方面。三十年代初期电解工业也开始用水银整流器作为电源。

水银整流器是一种离子变流器，与电动发电机组相比，当工作电压在 300 伏以下时效率较低，在 300 伏以上时效率则较高。如在广泛采用的 600 伏和 825 伏电压下，水银整流器的效率要高出 3% 和 6%。另外，它的效率几乎与负荷大小无关这也是一大优点。对于几万千瓦或更大容量的变流装置，那怕效率提高 1%，其经济效果也很大，因此较高的效率是保证水银整流器在许多应用方面取得进展的重要因素。如西德西门子公司，1920 年开始生产水银整流器，1930 年进入大量生产时期，十年间共生产了 18 万千瓦，曾一度被机械整流器所排挤，但由于它效率高，随着控制技术的改进逐渐又占了上风；到 1961 年共生产了 20 万千瓦，而机械整流器于 1960 年停产。

随着半导体技术的发展，二十世纪二十年代出现了氧化亚铜整流器，它是工业技术上采用的第一批半导体整流器，但由于其效率低、电流密度小、寿命短而被以后的硒整流器所代替。四十年代末，发明了锗整流器，起初因其功率较小，只能用于电子仪表及无线电装置。五十年代生产了大功率锗整流器，其功率远远超过了氧化亚铜整流器和硒整流器，因而得到重视。六十年代中期又出现了硅整流器，它在效率、电流密度、工作温度、电压和电流容量等性能都远远超过以往的任何半导体整流器，并因其体积小、寿命长、维护简单等而动摇了过去被广泛采用的水银整流器的统治地位。如日本 1960 年硅整流设备生产容量只占全部整流设备总容量的 15%，1963 年则达 85% 左右，主要用于冶金、化工、电解及电气铁道等方面；又如意大利 1960 年后新建的铁路中，都用硅整流代替水银整流器；罗马和米兰的地下铁道整流设备的总容量为 130000 千瓦，其中硅整流器约占 75%。

(二) 各种整流器的简介

机械整流器由于有可动部分，故称为旋转变流器；水银整流器，半导体整流器由于没有可动部分，故统称为静止变流器。

静止变流器的简介如下：

1. 水银整流器

图 1-1 是一种玻璃壳水银整流管的示意图，在管壳下部 K 中盛有水银，作为阴极。在支管 3 中也盛有水银，作为放电时引火用。 A_1 、 A_2 、 A_3 是三个主电极，分布在三个支管中，是用铁或石墨制成的。

为使阳极和阴极间的空间导电，要将管壳倾斜，使支管 3 中水银与阴极水银沟通，然后使支管壳恢复到原垂直位置，当 K 与 3 之间的水银桥中断时，就发生弧光放电，正离子打击阴极光点范围内的水银表面，就能引起这个地方的水银剧烈蒸发，贴近水银表面便形成了正离子云，在这样电位梯度下，使阴极放射电子，电子从阴极飞向阳极的过程中，撞击水银蒸汽，并使之电离，电子飞向阳极正离子飞向阴极，构成了阳极电路中的电流。

如水银整流器在工作时，负载电流中断或降低到维持光点的较小电流（大约为 3~5 安）以下，即使是很短的隙间，光点便消失，电弧熄灭，为了恢复整流器的工

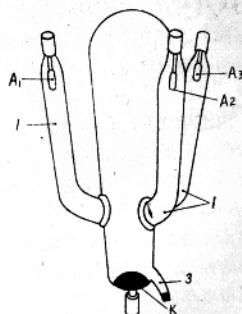


图 1-1 玻璃壳水银整流管示意图

作，必须重新“点火”，即倾斜管壳。为避免这种重复“点火”，可在管子上添置辅助极的支管，当支阳极电弧熄灭后，辅助阳极仍存在着弧光放电，可保证主阳极回路随时起弧。这种汞弧管就是所谓励弧管。

还有一种引燃管，通过引燃极（由一种与水银不发生作用的半导体材料制成）“点火”，它浸入水银阴极里，当加上一定电压时，就会引起阴极发射电子，从而产生弧光放电，在阴极面形成光点。引燃管着火后，引燃极上的电压就被切断。当阴极电位变为负值时，电流停止流动，光点消失；阳极重返正电位时，必须由引燃极重新“点火”电流方能流通。因此引燃极还有类似闸流管控制栅的作用。藉助“点火”瞬时的改变，可调节引燃管的输出电压。

引燃管只有一个阳极，而励弧管可以有一个或几个阳极。

引燃管引燃回路功率消耗小，自身压降也较小（15~20伏），短时过载能力大。

强功率水银整流器（几百或几千伏，几百或几千安）采用金属外壳，与玻璃壳的区别较大，由于密封性不十分完善，必需装抽气设备，以维持管内真空度。在钢与玻璃熔接技术提高后，也出现了密封汞弧管。

有时在强功率水银整流管的阳极和阴极间，装有一个（或1个以上）栅极，这实际就是水银阴极的闸流管。藉助栅极可调整管子输出电压的大小。引燃管装设栅极后，可以提高控制极的准确度，在高压引燃管（工作电压3~5千伏）中，还可防止主阳极电弧的自发着火。

2. 半导体整流器

（1）氧化亚铜整流器

氧化亚铜整流器的制法是把纯度很高的铜板冲成一定大小的圆片，尺寸更大时也可作成长方形或正方形，经研磨及一系列清洁处理后进行热处理；在1010℃~1003℃的高温炉中，使铜片表面生成一层氧化亚铜后，再在500~600℃的炉中退火，于是在氧化亚铜的表面产生一层氧化铜薄膜，退火后立即在蒸馏水中淬火。最后，除去表面的氧化铜层及一个面上的氧化亚铜薄膜，在留下的氧化亚铜薄膜上面喷涂一层金属（如锌、铝）作为上电极。

由于氧化亚铜是半导体，靠近铜片一层是n型的，靠近表面一层是p型的，从而形成一个具有整流特性的p-n结。它的击穿电压大约为6~8伏（有效值），正向压降为0.6~1伏。

（2）硒整流器

硒整流器的制法是先在一块金属板（如钢板或铝板）上镀一层镍后，蒸发一层无定形硒，无定形硒不是半导体，还要经过所谓的“晶化”处理，使无定形硒变成灰色的，具有半导体性质的多晶硒，最后在上面涂铍镉锡合金电极后，加反向直流电压（约5~6伏）形成硒化镉，便得到了整流特性。硒整流片的p-n结产生在铍镉锡合金电极和硒的交界面处，靠近基极的多晶硒层是p型的，硒与镉形成的硒化镉是n型的。一个硒整流片的耐压通常是16~18伏（有效值），正向压降约为1~1.2伏。

（3）硫化物整流器

典型的硫化物整流器是将硫化铜粉末高压压成薄片，再压在含有铝的镁电极上；另一电极是镀有镍或镉的黄铜片，在镁板和硫化铜间有一很薄的高电阻层。

尽管硫化铜整流器制造简单，价廉，允许的电流密度较大，约为3~9.5安/厘米²（氧化亚铜、硒整流器仅为几十毫安/厘米²），在美国曾做出电压30伏，电流1500安的整流器，但因效率低（55%左右），耐压低（4~5伏）、寿命短、所以不如氧化亚铜整流器和硒整流器应用得广。

(4) 锗整流器

锗整流器的制法是将 n 型锗单晶片通过合金或扩散过程，在其上生成 $p-n$ 结，并通过烧结等作欧姆接触引出各电极便得到了锗整流片，然后将整流片焊在外壳的底座上并密封好，便制成了锗整流器。

锗整流器的允许电流密度为 $75 \sim 100$ 安/厘米²，远远超过氧化亚铜、硒等整流器，耐压也高得多，可达数百伏、效率高达 98% 以上。

用锗整流器组装成的整流装置的总容量很容易达到几千安，几十伏，甚至可达几万安几百伏，作为工业用直流电源，如电镀、电解电源等。

但由于高纯度锗的来源很困难，特性又不如硅材料好，故发展受限制，发展速度也远不如硅整流器快。

(5) 硅整流器

硅整流器的制法类似于锗整流器，一般采用 n 型硅单晶片通过合金或扩散过程形成 $p-n$ 结。并通过烧结或蒸发作欧姆接触引出各电极，然后封装在外壳中便获得硅整流器。

由于硅材料的本身特性优于上述的半导体材料，所以硅整流器的特性比其它半导体整流器的特性好。例如硅材料的熔点 (1420°C) 比锗材料 (930°C) 高，禁带宽度 (1.08 电子伏特) 比锗材料 (0.66 eV) 宽，使硅整流器的最高工作温度 (200°C) 比锗整流器 (最高 100°C) 高得多，耐压也比锗整流器高得多，可达几千伏甚至万伏。

目前几百安 (甚至几千安) 耐压数千伏的硅整流器较成熟地达到工业规模的生产，1973 年各资本主义国家达到的生产水平见表 1-1。一般为 800 安、3000 伏。试制水平更高，如日本东芝公司的 1600FXD22 为 1600 安 3000 伏；美国西屋公司的 S10C452 为 2300 安 10000 伏。而且性能稳定，运用可靠，促使产量和产值逐年提高，以美国和日本为例，逐年增加的情况见表 1-2。生产的发展，为组装大功率硅整流电源提供了条件，在工业技术上明显的趋势是以硅整流装置代替以往的旋转变流机和水银整流器。

表1-1 1973年各资本主义国家硅整流器生产水平

国 家	公 司	型 号	电流(安)	电压(伏)
英 国	西屋	S50AR508	325	5000
英 国	西屋	S41C457	1460	4100
日 本	东芝	800 FX21	800	3000
瑞 典	通用电气	YSD903P30K50	850	3000
瑞 典	通用电气	SiD300P60K62	600	6000
美 国	通用电气	A500LP	800	3000

表1-2 美国和日本历年来硅整流器产量和产值的增长情况

国 家	年份 产量或产值	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
美国	产值(百万美元)	114	120	130	140	163	180.5	100.4	168.2	128.6	119.0	132.6	143.2	89.4
日本	产量(千个)	12630	19655	41251	47829	80240	118508	169247	288472	288472	436541	443028	—	—
	产值(百万日元)	—	—	—	6359	7346	10625	19864	—	—	—	—	—	—

(三) 各种整流器的比较

比较各种整流器的经济性能, 主要从投资、效率、过载能力、运行特性、维护等来考虑。根据不同用途, 侧重面各有不同, 如电解冶炼金属工业, 由于耗电量很大, 很重视整流器的效率, 那怕效率提高 1%, 节约的电能也非常可观。对某些特殊要求的应用, 从某一角度出发, 也可选用当前认为是落后的装置, 如用电磁测量仪器测交变电流时, 了为测量的精确度, 而采用稳定性及伏-安特性曲线线性好, 但允许负荷及效率都低的氧化亚铜整流器。

各种整流器的主要特性定性比较见表 1-3。

表 1-3 各种整流器的定性比较

	旋转变流机	水银整流器	接触式变流机	铜、硅整流器
构造	复 杂	简 单	复 杂	极 简 单
基础	必 须	不 要	不 要	不 要
安装	麻 烦	简 单	容 易	简 单
噪音	大	中	中	小
过载能力	大	大	小	小
消耗零件	金属电刷	无	接 点	无
维护工作量	大	不 大	大	小
价格	中	小	小	小
效率(%)	95左右	随电压变化大	99.5	98~99

水银整流器从二十年代起开始代替旋转变流机用于城市电车变电所、电气化铁道; 三十年代初用于电解工业。

当工作电压低于 300 伏时, 水银整流器的效率比旋转变流机低, 300 伏以上则变高, 在 600~800 范围内则高出 3~6%, 见图 1-2。水银整流器开动和停止简单、无噪音、易实现自动化、占地少、安装方便、土建投资少; 据估计当电压为 220 伏时的投资比电动机组便宜 1/3~1/2; 825 伏时便宜 3/5~2/3。

水银整流器有逆弧的危险, 为保证可靠地运行, 在一至四、五年内要将水银整流器体解一次, 但它检修容易而迅速, 电动机组检修复杂、时间长。总的说来, 水银整流器的可靠性并不比电动机组低。

水银整流器要耗消无功功率, 非可控时功率因数约为 0.93, 采用栅控调压时要低些, 而电动

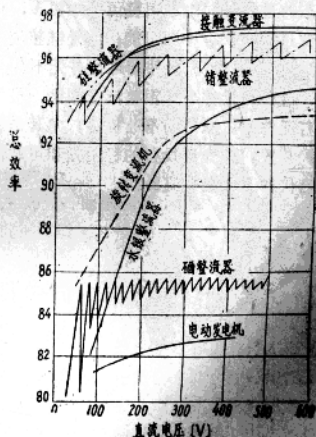


图 1-2 各种变流器总效率和电压的关系

机组不吸收无功功率。此外，水银整流器对操作者有水银危害的缺点。

接触式变流机工作电压在 300 伏左右时，其效率高达 99.5%，曾受到重视，特别是四十年代初，磁性合金的研究成果，促使无火花换向的解决，从而能完成电压在 500 伏以上，电流为几万安的接触式变流机的设计，使它一度得到发展，但因它耗消交流供电网路中的无功功率以及维护工作量大（接点要周期清洗，经常更换）等缺点，不如水银整流器及锗、硅整流器用得广泛。

初期的半导体整流器，如氧化亚铜整流器有许多优点，但效率低、容量小，不适于作工业电源；锗整流器效率高、但工作电压低，仍不能与水银整流器抗衡，只有当硅整流器出现后，半导体整流器才能与水银整流竞争。各种半导体整流器的主要特性见表 1-4。

表1-4 各种半导体整流器的主要特性

	氧化亚铜	锗	硫化物	锗	硅
最高工作温度(°C)	60	75	190	75	150~200
正同电流密度(安/厘米 ²)	0.05	0.05	3~9.5	40~100	80~200
反同峰值电压(伏)	20~30	50~60	12~15	200~750	几千
正同电压降(伏)	0.6~1	1~1.3	—	0.4~1.0	0.6~1.2
效率(%)	75	80	60	98	99
寿命	非永久性	非永久性	非永久性	半永久性	半永久性

硅整流器（硅变流设备）与水银整流器（汞弧变流器）相比的优点：

硅整流元件的正向压降比水银整流管低得多，因而硅整流器的效率比水银整流器高；在稳定可靠性方面，硅整流元件没有水银整流管的逆弧危险，工作更可靠；硅整流元件从断态到通态的过渡时间比水银整流管短得多，且导通后非常稳定，而水银整流管在电流急剧上升的瞬间过程中仍有中断可能；此外硅整流元件使用温度的下限比水银管低，一般自然条件下的过低温度对硅整流元件的运行并无不良影响。

硅整流元件与水银整流管相比，最大的缺点是过载能力小，必需加可靠的保护装置，但随着元件耐压水平的不断提高，尤其是雪崩型硅整流元件的出现和大量生产，再加上可靠的保护装置，硅变流设备的稳定性和可靠性已达到满意的结果，并得到广泛应用，在许多领域中已代替了水银整流器。

二、可控硅整流元件的基本情况

(一) 可控硅整流元件的发展简史

可控硅整流元件(以下简称可控硅元件)是五十年代末出现,六十年代发展起来的一种大功率半导体器件,有闸流管性能,所以又叫做固体闸流管,除具有硅整流元件相同的整流特性和优点外,最突出的是能以微小的电流控制大功率的机电设备,使半导体器件从弱电领域跨入了强电领域,为强电领域的自动化,创造了有利条件。

可控硅元件是由美国通用电气公司于1957年试制成功的,1958年成批投产,第一批产品为1安,200伏,销售价格为300美元。当时由于可控硅元件的耐压低、电流小、价格高,只用于中、小型装置,但由于可控硅元件本身兼备开关、相位控制及整流作用,所以自1957年问世以来,各资本主义国家为了榨取最大利润,都积极从事可控硅元件的试制和生产,产品水平逐年提高,1964年为150安、400伏,60年代末为400安,2500伏,70年代初为400安4000伏;产量也逐年提高,据1971年统计,日本年产量为14815千个(产值为7886百万日元),美国年产量为45364千个(产值为98.2百万美元)。随着可控硅元件产量及电流、电压的提高,促进了可控硅元件在大型设备上的应用,出现单机容量达10000瓩以上的轧机传动装置及数十万瓩的电解电源;随着可控硅元件动态特性的改进,扩大了它的应用范围,在各种变频及开关的应用中,迅速发展起来;随着可控硅元件价格的降低,特别是廉价的中小容量可控硅元件的出现,使得日常生活及轻工业产品中也广泛采用可控硅元件;随着可控硅应用技术及可靠性的提高,在电力系统中,如高压直流输电等也开始采用可控硅元件,标志着可控硅技术发展又进入一个新阶段。

总之,可控硅元件经历了五十年代的开发和提高阶段,六十年代的技术发展和品种发展阶段;七十年代的降价和扩大应用范围阶段,使可控硅元件已能较大规模的生产和较成熟的应用。到目前为止,可控硅元件用于电气传动,自动控制等已很普遍;钢铁、矿冶、化工、电力、交通运输、电机、电器以至日常生活中的电扇、电熨斗等都采用了可控硅元件。据报道,英国直流电动机的供电已有95%采用可控硅元件供电;美国已有80%轧机采用可控硅元件供电;意大利新的变速拖动中,可控硅变频器占90%;西德和瑞士直流电机的变速拖动几乎都用可控硅供电,由可控硅供电的交流电机也正在增加。

(二) 可控硅元件的简介

可控硅元件按外壳形状分有螺栓型和平板型两种,图2-1为螺栓型可控硅元件,底部为具有一定直径的螺栓是阳极,使用时藉助螺栓拧紧在散热器上,见图2-2,这种结构便于更换元件,目前100安以下及部分200安元件都采用这种结构。平板型可控硅元件见图2-3,外形象一个“饼”,“饼”的两面分别是它的阴极和阳极,由“饼”的四周金属环上引出的细线是它的控制极,使用时用二片散热器紧紧地夹在中间,二片散热器分别是阴极和阳

极, 见图 2-4, 这种结构散热效果比螺栓型好, 有利于提高元件的电流容量, 管壳籍压力与散热器接触, 耐热疲劳性能比锡焊式的螺栓型元件高, 但更换元件不如螺栓型元件方便, 目前 200 安以上的元件都采用这种结构。

可控硅元件按冷却方式分有空气冷却和液体冷却两种, 见图 2-4。不管可控硅元件的外形如何, 决定其电学特性的关键部分是外壳里面的一个圆薄片, 即管芯, 见图 2-5, 它的中心是 N 型硅片制成的 $P_1N_1P_2N_2$ 四层结构, 上、下钼层分别引出阴极和阳极, 在 P_2 层上引出控制极, 为减低表面电场, 将 $P_1N_1P_2N_2$ 结表面磨成 5-15 度角。



图2-1 螺栓型可控硅元件



图2-2 带散热器的螺栓型可控硅元件



图2-3 平板型可控硅元件



图2-4 带散热器的平板型可控硅元件
(a) 风冷; (b) 水冷

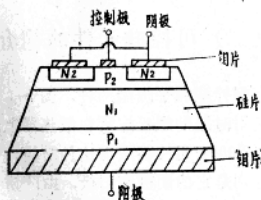


图2-5 可控硅元件的管芯

可控硅元件的电流-电压特性见图 2-6, 横座标代表电压, 纵座标代表电流, 以二轴相交之点为零点, 向上为正, 向下为负, 向右为正, 向左为负。所谓正负, 实际上是对电压而言, 阳极电压高于阴极电压为正; 相反, 阴极电压高于阳极电压为负。对电流而言, 若电流从阳极经可控硅管芯流向阴极为正; 相反, 由阴极流向阳极为负。因此, 图 2-5 上的第一象限 (右上角部分) 表示阳极加正电压, 阴极加负电压, 电流从阳极流向阴极的情况; 而第三象限 (左下角部分) 代表阳极加负电压, 阴极加正电压, 电流自阴极流向阳极的情况。从图 2-6 可知, 要使可控硅元件导通, 必需有两个条件, 一个是将其阳极接电源的正极, 阴极接负极; 另一个是要在其控制极上加正的触发电压。二者具全才能导电, 缺一不可。反之, 当阳极接负, 阴极接正, 不论控制极加不加触发, 可控硅元件始终不会导通。

可控硅元件在电路图中的符号见图 2-7。

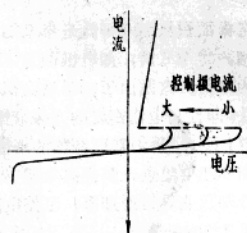


图2-6 可控硅元件的电流——电压特性



图2-7 可控硅元件的电路符号

(三) 可控硅元件制造技术的发展概况

在技术发展阶段, 为获得平坦而均匀的 PN 结, 首先在 $PNPN$ 结制法上作了研究, 先后采用了扩散-合金法, 全扩散法、扩散-外延法等, 它们的制造工艺及优缺点见表 2-1。

表2-1 可控硅元件的制造工艺及其优缺点

使用年份	工艺方法	工 序	优 点	缺 点	注
1957	扩散-合金法	采用N型硅片一次扩散形成PNP后, 再一次合金形成PNPN	工艺简单, 需用设备少, 生产周期短, 成本低	合金过程较难控制, 制造结构特殊的元件有一定困难, 使用黄金量大	是生产广泛采用的方法
1960	全扩散法	采用N型硅片一次扩散形成PNP后, 再一次扩散形成PNPN	扩散数量大, 有利于大量生产, 易于制造大面积平坦的PN结, 可以借助氧化、光刻技术制造复杂的几何图形以满足特殊要求, 耗黄金少	工艺设备复杂, 流程长, 欧姆接触较困难	是制造高压、高性能元件的主要方法
1969	扩散-外延法	采用N型硅片一次扩散形成PNP后, 外延形成PNPN	外延层厚度及杂质浓度可严格控制, 较易获得体雪崩特性, 动态特性也比其它方法制造的好	工艺较复杂, 技术要求较高	是发展方向

在 PN 结制造技术得到初步解决后, 其后的试制及研究工作主要是集中在提高电流、电压和改进动态特性即开关时间、电流上升率和电压上升率等。

1. 提高电流的途径

采用大直径硅片在一定程度上可提高电流, 因此可控硅元件的管芯直径逐年增大, 见表 2-2。

表 2-2 可控硅元件管芯直径的发展过程

年 份	1959	1963	1967	1971	1976
管芯直径(毫米)	15	23	33	50	100(估计)

但增加直径并不是积极的方法, 如螺栓型元件的电极面积从 300 平方毫米增加到 600 平方毫米, 为 2 倍, 而电流只从 200 安培增加到 300 安培, 为 1.5 倍, 如电极面积再增加到 1000 平方毫米, 为 3 倍多, 而电流只增加到 400 安培为 2 倍, 这是由于 PN 结面积增大, 内部所产生的热不易传出所致, 因此必需采用积极的方法, 即提高电流密度的方法来提高电流, 这样必需着重于研究冷却方法, 于是在 1967 年西德西门子公司采用双面冷却的平板型结构, 在同样条件下, 它的电流容量比单面冷却的螺栓型增加 60%, 更进一步提高电流容量的方法是改进散热器结构和冷却条件, 如采用水冷、氟里昂冷却及热导管冷却等, 可使电流容量成倍增加, 经过这些改进, 目前可控硅元件的最大电流可达 2000 安。

2. 提高电压的途径

提高元件的电压, 除采用高电阻率、低位错密度、长寿命的均匀单晶及使用扩散技术制造 PN 结以获得体雪崩击穿电压外, 另一重要途径是改变表面结构, 降低表面电场, 提高表面耐压, 使表面电场低于体内, 以保证体击穿。

1962 年美国通用电气公司发表磨角解析, 证明 PN 结表面磨成斜面, 可使表面电场减弱, 于是开始将管芯表面磨成斜面, 见图 2-8 (1)。对于 1000 伏以上的元件都采用正斜角 α_1 和负斜角 α_2 的二级斜角法, 见图 2-8 (2)。所谓正斜角是面积由高杂质浓度侧向低杂质浓度侧方向减少; 负斜角是面积由低杂质浓度侧向高杂质浓度侧方向减少, 实验证明正斜角比负斜角更有利于减少表面电场, 如要获得 3000 伏以上的电压, 正斜角磨 45° 就能达到, 而负斜角则要 1° 左右, 这在制造上有困难, 而且阴极面积损失太大, 不很经济, 故 1969 年日本开始采用双正斜角法, 见图 2-8 (3), 使电压提高到 4000 伏以上。

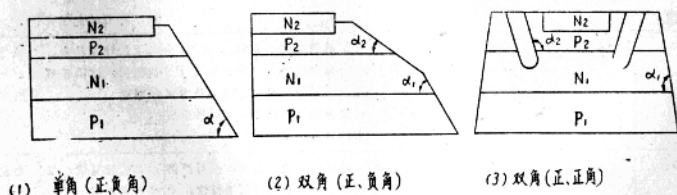


图 2-8 磨角后的各种表面形状

3. 改进动态特性的途径

改进动态特性主要是提高电压上升率 (dv/dt) 和电路上升率 (di/dt) 及缩短关断时间。

提高电压上升率的最有效方法是采用发射极短路结构, 所谓发射极短路结构就是把阴极面的某些部分 (均匀分布的) 保持 P 型, 将这些部分通过欧姆接触与阴极连接在一起, 称这些点为短路点, 由于短路点的存在, 位移电流大部分通过短路点跑掉而不经 J_s 结, 只有当位移电流流过短基区所产生的横向压降达到 J_s 结的势垒电压时, 电流才从 J_s 结流过, 采用这种结构可获得 1000 伏/微秒的电压上升率。短路发射极结构, 见图 2-9。

提高电路上升率的最有效方法是改进控制极结构, 它的目的在于增加阴极初始导通面积及加速导通面积的扩展。控制极结构开始为月牙控制极结构, 其后相继发展了中心控制极结构、外圆控制极结构、引进场结构、再生控制极结构、放大控制极结构等, 见图 2-10。中心控制极结构和外圆控制极结构主要是增加控制极与阴极

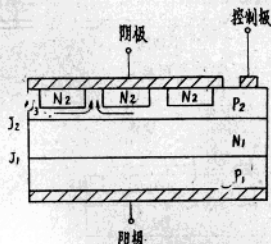


图2-9 短路发射极结构

的交界长度及缩短在阴极中的扩展距离。从引进场结构开始, 有了新的含义, 利用电场加速阴极面积的导通。引进场结构是在靠近控制极的阴极面上的 A 、 B 间开槽, 当加控制极信号时, A 部首先导通, A 部的电位提高到阳极的电位, 在槽的两侧产生强大的电场, 促使阴极迅速全面导通; 再生控制极结构与引进场结构不同之处是 A 点与若干个称为再生控制极的 C 点相连, 当触发后, A 点导通, 电压上升到阳极电位, 而与 A 点相连接的 C 点电位也提高到阳极电位, 促使阴极从各方面更快地导通; 放大控制极结构的控制部分由一个控制极和一个小可控元件组成, 小可控元件相当于信号的放大器, 起放大控制极脉冲的作用, 采用以上种种结构, 使电路上升率提高到 1000 安/微秒。

缩短关断时间的主要方法是采用基区掺金 (金扩散法) 以降低基区少数载流子寿命; 最近采用控制复合中心的分布和复合中心的密度, 也可降低基区少数载流子寿命而不显著增加正向压降; 其它如高能粒子的轰击也能降低少子寿命, 但因不易掌握而未用于生产。

在封装方面的改进主要在管壳的结构和管壳、管芯间的接触上面, 管壳结构经历了金属-玻璃密封、金属-陶瓷密封、金属-塑料密封等几种型式, 其主要目的是提高机械强度和绝缘性能以提高耐压能力。金属-陶瓷密封是小容量元件广泛采用的一种方法; 金属-陶瓷密封用于大容量高电压元件; 金属-塑料封装目前使用虽不多, 但由于塑料成本低, 成型简单, 是发展方向。管壳与管芯的连接经历了软焊、硬焊和压接三种方式, 其主要目的是消除不同金属间接触时所产生的热疲劳。软焊是以低熔点焊料进行焊接, 此法工艺简单, 但在使用过程中经过几千次热循环就会发生热疲劳, 使元件性能降低, 甚至损坏, 所以只适用于小容量元件; 硬焊是用高熔点焊料进行焊缝, 此法工艺复杂、成本高, 技术要求高, 但能提高元件的热循环次数, 可达一万次以上; 压接有内压接 (螺栓型) 和外压接 (平板型) 之分, 它们是利用弹簧的压力将管芯压紧, 藉助弹簧的弹力, 管芯在电极间可以自由地膨胀和收缩, 从根本上消除了热疲劳, 因此是目前大容量元件广泛采用的方法。

最后, 将历年来可控硅元件结构上的改进归纳于表 2-3。

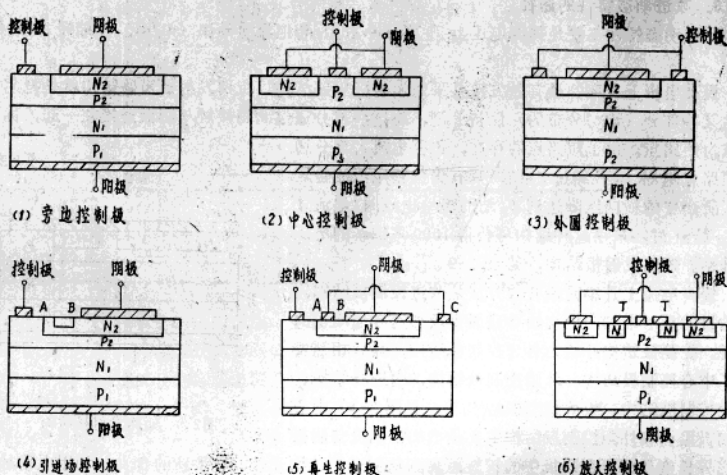


图2-10 各种控制极结构

表2-3 可控硅元件结构上改进的年表

年 份	项 目	主 要 作 用	发 明 单 位
1959	中心控制极结构	提高电流上升率	美国西屋公司
1959	短路发射极结构	提高结温和电压上升率	美国通用电气公司
1964	引进场结构(FI结构)	提高电流上升率	美国通用电气公司
1964	双斜角表面结构(正、负角)	提高电压	美国通用电气公司
1964	内压模式结构	消除热疲劳	西德西门子
1965	放大控制极结构(AG结构)	提高电流上升率	美国通用电气公司
1965	平板型结构(外压接结构)	提高电流	西德西门子
1968	氟里昂冷却	提高电流	日本富士公司
1969	双正斜角表面结构	提高电压	日本东芝公司
1972	导热管	提高电流	美国
1972	机械冷却	提高电流	美国功率半导体公司
1972	气相冷却	提高电流	美国功率半导体公司

(四) 可控硅元件的生产概况

经过以上改进,使可控硅元件的生产迅速发展起来。在资本主义国家中,以日、美的产量发展较快,其产量和产值见表2-4。从表中可看出,在六十年代,产量和产值逐年有提高,

如日本 1972 年的产量为 1965 年的 18.1 倍, 产值为 6.4 倍; 美国 1972 年的产量为 1962 年的 32.4 倍, 产值为 7.9 倍。

表 2-4 自 1962 年以来, 美、日可控硅元件的产量和产值

年 份	日 本		美 国	
	产量(千个)	产值(百万日元)	产量(千个)	产值(百万美元)
1962	—	—	1400	15
1963	—	—	1800	21
1964	—	—	—	25
1965	1059	1164	—	33
1966	1151	1475	18300	39
1967	1844	5142	25367	56.1
1968	4023	—	32964	59.7
1969	8245	6819	—	65.2
1970	15645	10252	44417	69.8
1971	14815	7886	45363	98.2
1972	19173	7377	—	89.4

注: 1. 日本自 1965 年开始才将可控硅元件分出来;

2. 产量、产值的统计, 自 100 毫安可控硅元件开始。

随着生产的发展, 产品水平也逐渐提高, 日本和美国可控硅元件的电压、电流逐年提高的情况见表 2-5。以日本为例, 1959 年为 10 安, 400 伏, 1966 年为 400 安, 2500 伏, 1967 年为 700 安, 2500 伏, 1969 年为 1600 安, 2500 伏和 250 安, 10000 伏。其它资本主义国家如英、西德、瑞士等也有相应的发展。它们目前所达到的生产水平见表 2-6。

表 2-5 美国和日本两年来所达到的生产水平

年 份	美 国		日 本	
	电流(安)	电压(伏)	电流(安)	电压(伏)
1958	1	200	—	—
1959	70	400	10	400
1961	150	—	—	—
6162	70	1300	200	—
	235	400	—	—
1963	250	600	—	—
	300	400	—	—
1964	—	—	350	600
1965	500	1300	—	—
1966	—	—	400	2500
1967	—	—	700	2500
1968	1000	2800	—	—
1969	1500	1200	1600	2500
			250	10000

表2-6 1973年各资本主义国家可控硅元件生产水平

国 家	公 司	型 号	电 流(安)	电 压(伏)	结 构
日 本	日立	CA02	800	4000	平板型
		CA01	1000	2500	平板型
	富士	KGP04-25	480	2500	平板型
		SF1000EX22	1000	2500	平板型
	东芝	FT1000A50	1000	2500	平板型
		SF800A	600	4000	平板型
美 国	通用电气	C600PB	1400△	1200	平板型
		C602LE	940△	2500	平板型
	国际整流器 西屋	470PA170	850	1700	平板型
		286-Y30	300	2000	螺栓型
		270ZH	550	1400	螺栓型
英 国	西屋制动器	458T25	1180	2500	平底型
		444T30	930	3000	平底型
		71T40	400	4000	平底型
瑞 典	通用电气	YST801SP18K ₂	1000	1800	平板型
西 德	通用电气	T175N2600	230△	2600	平板型
		T302N1500	370△	1500	平板型
	西门子	BS ₁ P05110	1000	1600	平板型
		BS ₁ P45166	940△	2500	平板型
	勃朗·施维利	CS200-271 ₈₂	235	2700	平板型
瑞 士	勃朗·施维利	CS401-251 ₀₁	400	2500	平板型
		CS500-16	500	1600	平板型
法 国	联合电气工业	TT3160	200	1600	螺栓型
苏 联			250~300	1500~2500	

注：△为有效值。

(五) 可控硅元件的可靠性

在一定生产数量,并经过一段时间使用的基础上才有可能统计可控硅元件的可靠性,如日本在1964年开始将150安,400伏可控硅元件用于交通车辆上,到1970年为止(1970年采用400安,2500伏可控硅元件)大约共用了8000只元件;在使用过程中,对发生的故障,进行逐个登记及分析,发现其中有46只发生故障,统计出元件的平均故障率为 $7.7 \times 10^{-4}/1000$ 小时,即使用了1000小时后有 7.7×10^{-4} 个元件发生故障。又如日本1967年制成的一台750伏,4500瓦的付传动可控硅变流器中使用了400安,3000伏大功率可控硅元件3600个,辅助可控硅元件1007个,大功率可控硅元件的现场故障率为 $3 \times 10^{-5}/1000$ 小时,辅助可控硅元件的现场故障率为 $2 \times 10^{-5}/1000$ 小时。由此可见,可控硅元件的可靠性是非常高的,达到如此高的可靠性主要是通过两项措施:

1. 保证生产环境的清洁度

实践证明小绝缘颗粒(直径 $<2000 \text{ \AA}$)会引起微等离子击穿和噪音,较大颗粒能引起沟