

可控硅整流元件

西安整流器研究所

第一机械工业部情报所

前 言

硅材料、可控硅整流元件（以下简称可控硅元件）和可控硅元件的应用，三者是独立而又统一的东西。众所周知，没有硅材料，要制作可控硅元件，根本不可能；有了硅材料，如没有大直径的单晶硅就不可能制造大容量的可控硅元件；没有结构完整、性能均匀的单晶硅就不可能制造出高质量的可控硅元件。同样，有了可控硅元件，如不付诸应用，既不能暴露矛盾，促进可控硅元件本身的发展，也不能发挥它在国民经济中作用，就会自行消亡。常见的应用促元件的例子也很多，如可控硅元件用于电解行业，由于电解需要大电流元件，迫使可控硅元件向大电流方向发展；用于直流输电时，由于直流输电要求提供5000伏甚至更高电压的可控硅元件，于是可控硅元件向高电压方向发展；将可控硅元件用于中频电源时，因中频电源要求元件的关断时间短、电流上升率和电压上升率高，于是促使可控硅元件向快速方向发展。由此可见，三者是缺一不可的，因此，在介绍可控硅元件的发展情况时，先介绍硅材料的发展情况，重点放在可控硅元件本身的发展，最后介绍可控硅元件的应用发展概况。

目 录

前言

一、硅材料国外基本情况	1
(一) 多晶硅的发展概况	1
(二) 单晶硅的发展概况	3
(三) 单晶硅的发展动向	4
二、可控硅整流元件 (简称可控硅元件) 国外基本情况	6
(一) 可控硅元件的概况	6
(二) 可控硅元件的技术发展概况	8
(三) 可控硅元件的生产概况	11
(四) 可控硅元件的可靠性	13
(五) 可控硅元件的价格	15
(六) 可控硅派生元件的发展概况	15
(七) 硅功率器件制造工艺的发展动向	17
(八) 测试设备的动向	20
三、可控硅元件的应用	20
(一) 可控硅元件的应用概况	20
(二) 可控硅元件在各领域中的应用情况	21
四、企业情况	31
(一) 日本的企业情况	31
(二) 日本的技术引进情况	33
主要参考资料	33

一、硅材料国外基本情况

半导体元素的种类很多，但最实用的是锗和硅两种元素，五十年代初期锗居主导地位。当时各主要资本主义国家虽已开始硅材料的生产(见表1)，但硅材料的提纯和结晶技术还没有过关。鉴于硅具有资源丰富、性能良好等优点，因此自1950年以来，人们一直在大力研究硅的提纯和结晶技术，终于于1952年首次用克劳斯基技术(一般称为直拉法)成功地从100~200克硅熔体中拉出直径达25毫米的单晶硅；1958年用悬浮区熔法(一般称为无坩埚区熔法简称浮区法)制造出高纯度单晶硅；六十年代初又发展了外延工艺。随着单晶硅的研究和制造工艺的逐渐成熟，自1964年起硅便开始取代锗，开始在半导体工业中居主导地位。估计到七十年代末期，半导体材料的用量中硅仍将占主导地位，约占90%，而其它半导体材料只占10%左右。

表1 各主要资本主义国家硅材料的投产年份

投 产 国 家	美 国	西 德	英 国	法 国	日 本
投 产 年 份	1951	1957	1958	1958	1959

硅材料包括多晶硅和单晶硅，现分别将它们的发展情况简述如下

(一) 多晶硅的发展概况

近年来，生产硅材料的主要国家如美、日、西德等，对多晶硅的制法作了一系列的研究和改进工作，见表2。其中杜邦法由于质量太差，已被淘汰；西门子法和硅烷热分解法质量较好，产量又高，已为大多数国家所采用。

表2 多晶硅制法的演变

国 家	单 位	制 法 名 称	开始年份 (年)	电 阻 率 (欧姆-厘米)
美	杜邦公司	四氯化硅锌还原法(杜邦法)	1951	30~100
西德	西门子公司	三氯氢硅氢还原法(西门子法)	1955	30000
美	贝尔电话公司	四氯化硅氢还原法(贝尔法)	1956	400~3000
法	倍西内公司	三氯氢硅热分解法(倍西内法)	1956	400~600
英	国际标准电气公司	硅烷热分解法	1956	10000
日	石坂研究所	硅烷热分解法	1959	10000

随着硅元件的发展，多晶硅的产量迅速增长，以日本为例，日本1960年多晶硅的产量为2.3吨，1965年产量12.4吨，为1960年的5.4倍；1970年生产150吨，为1960年的62.5倍，为1965年的12.1倍。日、美、西德等国自1960年以来历年的多晶硅产量见表3。

表3 美、日、西德1960年以来，多晶硅和单晶硅的产量(吨)

年 份 (年)	美 国		日 本		西 德	年 份 (年)	美 国		日 本		西 德
	多晶硅	单晶硅	多晶硅	单晶硅	多晶硅		多晶硅	单晶硅	多晶硅	单晶硅	多晶硅
1960	34.3	8.7	7.3	—	—	1967	246*	—	35.6	16.1	—
1961	27.6	7.4	3.9	1.2	—	1968	80	46	40.8	17.8	—
1962	36.9	9.6	6.3	2.0	—	1969	300*	—	86.7	35.7	70
1963	34.6	6.7	10.7	2.6	—	1970	160	—	150	60	96
1964	60*	—	13.6	3.3	—	1971	320	—	164	—	—
1965	100*	—	12.4	3.9	—	1972	—	—	190	—	—
1966	150*	—	19.7	9.2	—	1973	—	—	226*	—	—

* 为估计值

对多晶硅质量水平的估计，一般以含硼量来计算，如日本窒素电子化学公司的多晶硅质量分为三级(见表4)。

表4 日本多晶硅的质量级别

级 别	含 硼 量	占 产 量 的 %
I	0.02~0.05 ppb*	10
II	0.05~0.1 ppb	40
III	0.1~0.2 ppb	50

* ppb 为十亿分之一

氮和氧的含量也是一个重要的指标，日本窒素电子公司多晶硅的氮和氧含量为 7×10^{17} 原子数/厘米³。从统计的观点来看，多晶硅的含硼量大致在 0.02~0.1 ppb 范围内，氮和氧含量约为 10^{17} 原子数/厘米³。

日本多晶硅质量的发展状况见表5。目前多晶硅棒的最大直径为 130~140 毫米，最大长度为 1000 毫米。

表5 日本单晶硅、多晶硅质量发展状况

名 称	性 能 指 标	1968年	1969年	1970年	1971~1975年 计 划 指 标
多 晶 硅	直径(毫米)	75	100	130	160
	氮和氧含量(原子数/厘米 ³)	5×10^{17}	3×10^{17}	2×10^{17}	$< 10^{17}$
直拉单晶	直径(毫米)	40	50	60	75
	径向电阻率不均匀度(%)	±15	±12	±10	±8
	位错密度(腐蚀坑数/厘米 ²)	3000以下	2000以下	1000以下	300
区熔单晶	直径(毫米)	40	45	50	60
	径向电阻率不均匀度(%)	±15	±12	±10	±7
	位错密度(腐蚀坑数/厘米 ²)	2×10^4	1.2×10^4	1×10^4	10^4 以下
外 延 片	直径(毫米)	30	40	50	
	生长层	试验	二重或反型导电生长层	二重或反型导电或选择生长层	
各种单晶薄片	薄片加工表面光洁度	直径大于40毫米 厚度小于250微米 表面平行度小于5微米 表面平坦度小于1微米			

(二) 单晶硅的发展概况

目前制造单晶硅的方法有直拉法和浮区法两种。直拉法是当前生产单晶硅的最主要方法，估计约有60~70%的单晶硅是用此法生产的，有30~40%是用浮区法生产的。

直拉法和浮区法在生产工艺及其生产的单晶特性和用途等方面都有些不同，表6是直拉法和浮区法的简单比较。

表6 直拉法和浮区法的简单比较

方 法	直 拉 法	浮 区 法
工 艺	有坩埚，一般为电阻加热	无坩埚，一般为高频加热
单 晶 的 特 性	适宜于生产大直径的单晶 纯度较低(含氧、碳量较高) 径向、轴向电阻率分布不很均匀 位错密度低 适宜于生产低、中阻单晶，100欧姆·厘米以上时难以控制	难以生产大直径的单晶 纯度较高(含氧、碳量低) 径向、轴向电阻率分布较均匀 位错密度高(也能生产无位错单晶) 能生产高阻单晶
用 途	制作晶体管 二极管 集成电路	制作耐高压整流器可控硅元件等 (也可以用作晶体管和二极管)

从表6可见，直拉法和浮区法各有长处和缺点，目前两者不能相互代替。为满足制造各种器件的要求，这两种方法不能偏废。

目前，国外单晶硅的生产工艺已相当成熟，生产设备已自动化，有的采用程序控制，有的采用计算机控制。表7为单晶硅的生产水平，表8为各国单晶硅的研制水平。

表7 单晶硅的生产水平

	直 拉 单 晶	浮 区 单 晶
直径(毫米)	60	50
径向电阻率不均匀性	$\pm 10 \sim 15\%$	$\pm 10\%$
含氧量(ppm*)	2~5	无
位错密度(腐蚀坑数/厘米 ²)	3000	10^{14} 改进后降至500

* ppm 为百万分之一

表8 美、日、法单晶硅研制水平

	美 国	日 本	法 国
单晶硅的重量(公斤)	3~5	4.3	10(直径100)
直拉单晶硅的直径(毫米)	75~120	75~100	75~100
浮区单晶硅的直径(毫米)	75	50~60	

随着设备完善、工艺成熟、高纯度多晶硅供应越来越充足，单晶硅的生产也迅速发展起来。日本1961年单晶硅的产量为1.2吨，1965年为3.9吨，是1961年的3倍，1970年为60吨，是1961年的58.3倍，1965年的18倍。表3为1960年以来美、日两国单晶硅的产量。

单晶硅的生产除要适当增大直径外，更主要的是提高单晶的质量，改善电阻率和位错分布的均匀性。现将日、美两国单晶硅的直径和重量的发展情况列于表 9 和表 10；日本单晶硅质量的进展情况列于表 5，1969 年美国得克萨斯仪器公司单晶硅质量指标列于表 11。

表 9 日本单晶硅的直径和重量发展情况

年 份 (年)	1960	1965	1970	1975(预计)
直拉法：直径(毫米)	15~25	25~30	30~60	40~75
重量(克)	100~250	400~1000	1000~5000	2000~10000
浮区法：直径(毫米)	9~15	20~25	25~50	36~60
重量(克)	200	200~400	200~600	300~1000

表 10 美国单晶硅的直径和重量发展情况

年 份 (年)	1960	1965	1970
直径(毫米)	12~25	25~50	50~70
径向电阻率变化(%)	30	20	15
位错密度(腐蚀坑数/厘米 ²)	50000	10000	1000
表面光洁度(微米)	0.5	0.25	无
晶体重量(克)	200	1000	4000

表 11 美国得克萨斯仪器公司硅单晶质量指标(1969 年报导)

参 数	直 拉 单 晶	浮 区 单 晶
直径(毫米)	13~75	13~40
长度(毫米)	50~1000	50~400
电阻率：掺硼	0.0007~50	0.001~300
掺磷	0.0015~40	0.001~300
掺锑	0.0015~20	1~50
掺砷	0.0015~20	0.001~1
位错(腐蚀坑数/厘米 ²)	3000 以下	500 以下
少数载流子寿命(微秒)	10~100	10~175
含氧量(原子数/厘米 ³)	$1.4 \sim 2.6 \times 10^{17}$	小于 10^{17}
径向电阻率不均匀度(%) (由中心至 1/2 半径)	1. 电阻率 ≤ 10 欧姆·厘米 直径 40 毫米时为 10~18% 直径 50 毫米时为 15~23% 2. 电阻率 > 10 欧姆·厘米 直径 40 毫米时为 15~23% 直径 50 毫米时为 20~28%	1. 电阻率 ≤ 30 欧姆·厘米 直径 40 毫米时为 8~16% 2. 电阻率 > 30 欧姆·厘米 直径 40 毫米时为 13~21%

(三) 单晶硅的发展动向

近年来，为了进一步提高器件的质量、节省原材料、提高生产率，除加大单晶直径、提高单晶质量（主要是完整性和性能的均匀性）和改进工艺外，还在改进晶体的物理形状方面如片状单晶等作了一些研究。

1. 加大单晶的直径

大规模集成电路，大电流整流元件和可控硅元件的发展，要求加大单晶硅的直径。而采

用大直径晶体又可以降低器件的制造成本。因此，国外制备单晶的直径有逐渐加大的趋势。

在五十年代，单晶硅的直径只有十几毫米，到六十年代初期，直径也只有 20~30 毫米，但到六十年代末，美国和日本一般都采用了直径为 50 毫米的单晶硅，预计几年之后，直径 75 毫米的单晶硅将广泛被采用。如果只从控制单晶的角度来看，目前也可以拉出直径为 100 毫米的单晶硅，但质量不好。据称在七十年代后半期单晶硅的直径可发展到 100~150 毫米。

但是，值得注意的是单晶直径加大，不仅给单晶生产本身带来困难，而且对随后的晶体加工（切、割）和制造工艺（扩散、光刻）也带来许多困难，这些设备和工艺问题也应予以解决。

2. 提高单晶的质量

单晶硅的质量对器件的成品率、性能、可靠性和稳定性等方面都有极大的影响，因此对单晶硅提出了纯度高、性能均匀、结构完整等方面的要求。

（1）结构完整的晶体

晶体中的缺陷和含氧量将严重影响器件的性能，实验证明原材料的晶格缺陷愈多，热处理后所产生的缺陷也愈多，由于半导体器件的制造过程中要经过几次热处理，致使晶格缺陷增加 4~5 个数量级，此外，含氧量也是构成硅表面产生缺陷的主要原因之一，氧在热处理后被激活，起施主作用，使原材料的电阻率发生变化，所以应尽可能减少缺陷和含氧量。据报道，无位错（ $<500\text{个}/\text{厘米}^2$ ）、无氧（ $\sim 10^{10}\text{原子}/\text{厘米}^3$ ）的单晶硅在市场上已有出售，如美国得克萨斯公司的 Lopex 单晶硅、直径为 35 毫米；道一柯宁公司的 perf-x 和 Mon-x 单晶硅，直径为 40 毫米。日本东芝公司也制造出直径为 35 毫米的无位错、无氧的单晶硅。日本最近报导用浮区法生长出直径为 60 毫米；用直拉法生长出直径为 50 毫米，长 300~500 毫米，重量 3~4 公斤的无位错单晶硅。

（2）均匀的特性

在单晶硅的特性参数中，对器件电特性影响最大的是电阻率，因此应根据各种器件的具体要求对电阻率进行严格控制，并力求保持其均匀性。各种器件所要求的电阻率的大致范围列于表 12。

表12 各种器件所要求的大致范围

器 件 名 称	单晶导电类型和电阻率的范围（欧姆·厘米）
可控硅元件	N 型 90~120（耐压2000伏） N 型 150~200（耐压3000伏） N 型 220~300（耐压4000伏） 一般元件要求在15以上
大功率硅整流元件	N 型 50~200 P 型 1000~4000
中功率硅整流元件	N 型 75~125 P 型 100~200
小功率硅整流元件	N 型 20~30 P 型 30~400
晶 体 管	N 型 1~3 P 型 1~15
二 极 管	N 型 0.05~100
太阳电池	N 型 0.1~10
外延衬底	0.005~0.02

目前,对N型(掺磷)单晶来说,径向电阻率变化范围可控制到15%;对P型(掺硼)单晶来说,径向电阻率变化范围可控制到10%。但预计在今后几年内,器件对它将会提出更高要求,要求在 $\pm 5\%$ 以内。如对耐高压的晶体闸流管来说,在设计时,就要求使用电阻率为几百欧姆·厘米的无氧单晶,其径向电阻率变化范围要求控制在5%以下。

3. 气相生长单晶

最近,美国、日本、西德等对气相生长单晶的研究已取得一定的进展,此法不经过提炼多晶的步骤,而是直接用三氯氢硅在 $1300\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 下,像外延生长单晶一样,在籽晶上生长出单晶棒。此项技术是西德西门子公司发明的,在1964年由瓦克化学公司的布尔格豪森厂试产,制得直径为22毫米、长为300毫米、电阻率为1500欧姆·厘米以上的N型单晶硅,据称该公司已进行工业生产,看来此法是个发展方向。

4. 带状单晶

带状单晶是由美国得克萨斯仪器公司发展的一种新技术,此法采用的是定形的籽晶和定形的熔体,并在定形的熔体内保持适当的温度梯度,以控制硅带的尺寸,拉出带状晶体,据称已提出 $0.5\times 12\times 600$ 毫米的带状单晶,电阻率变化范围在 $\pm 10\%$ 以内,位错低,厚度可以控制。

与此同时,美国西屋电气公司和道-柯宁化学公司采用枝蔓法生长出长9.15米、宽25.4毫米、厚70~250微米,电阻率变化范围为 $\pm 5\%$ 、位错密度低的硅蹼。最近又制得宽30毫米、厚100微米、平整度2.5微米、位错密度约1000/厘米²的硅蹼。采用这种工艺可以大量节约原材料、晶体表面不用机械加工,因而无机械损伤,且电阻率分布均匀。

综上所述,硅材料的发现,始于四十年代,五十年代为发展和研究阶段、六十年代开始成熟,至今已成为最重要的半导体材料。

二、可控硅元件国外基本情况

(一) 可控硅元件的概况

可控硅元件是一种大功率半导体器件,它的主要特点是能以微小的电流控制大功率的机电设备,使半导体元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十分有利的条件。

可控硅元件与其它整流元件相比较,具有体积小、重量轻、效率高、寿命长、使用维护方便等优点,所以自1957年出现以来,各资本主义国家都积极从事可控硅元件的试制及生产。经过五十年代的萌芽生长阶段;六十年代的技术发展和多品种阶段;七十年代的降价和扩大应用范围的阶段,使可控硅元件已能较大规模的生产,较为成熟的应用。

可控硅元件从管壳分有螺栓型和平板型两种;从冷却方式分有空气冷却和液体冷却两种,见图1、2、3、4。可控硅元件的内部是管芯,它是用N型单晶硅片制成的PNPN四层结构,然后在各相应层上安装电极并引出控制极、阴极和阳极见图5,它所具有的电-电压特性及电路符号见图6。

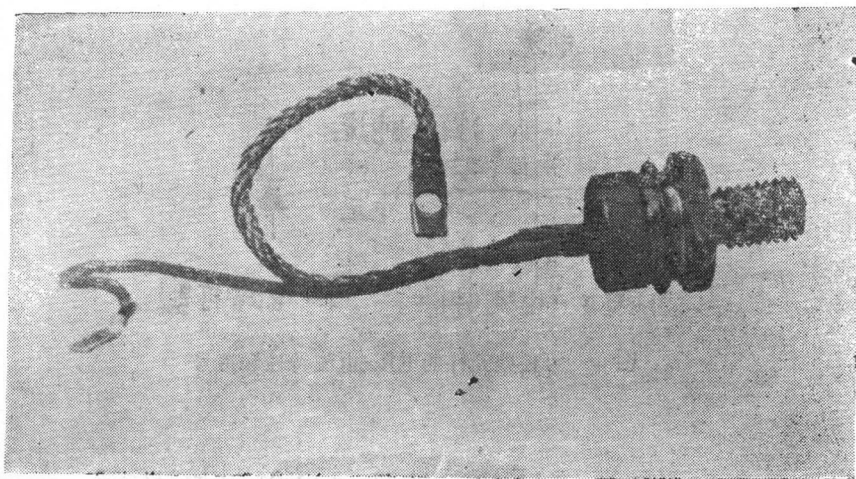


图1 螺栓型结构可控硅元件



图2 平板型结构可控硅元件

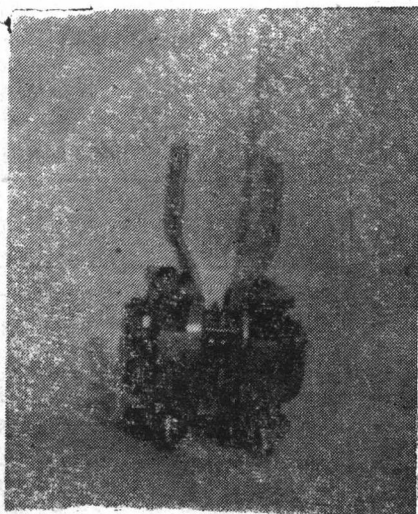


图3 水冷可控硅元件

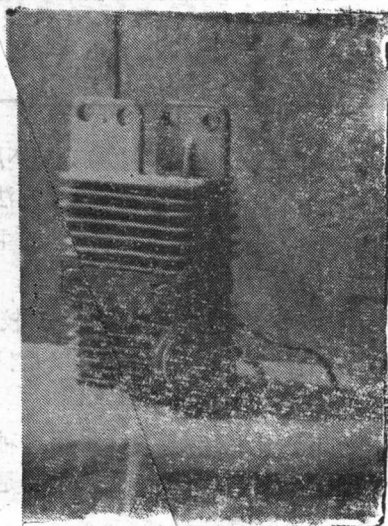


图4 风冷可控硅元件

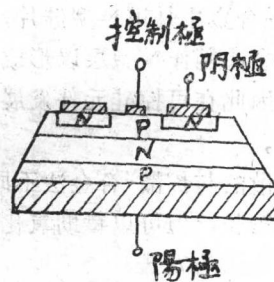


图5 可控硅元件的管芯

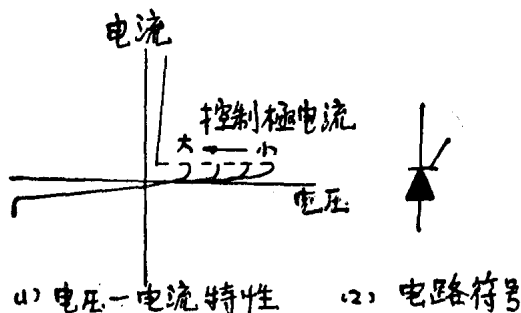


图6 可控硅元件的电压-电流特性和符号

(二) 可控硅元件的技术发展概况

在技术发展方面，为获得平坦、均匀的PNPN结，首先在结的制法上作了研究，先后采用了扩散-合金法、全扩散法、扩散-外延法等，见表13。

表13 可控硅元件的PNPN结制造工艺

使用年份 (年)	方 法	工 序	优 点	缺 点
1957	扩散-合金法	一次扩散 一次合金	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，制造特殊结构的元件有困难，使用黄金量大
1960	全扩散法	二次扩散	扩散数量大，有利于大量生产，扩散过程较易控制，易于制造大面积平坦的PN结，可以采用氧化和光刻等工艺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，费时间，欧姆接触较困难
1969	扩散-外延法	一次扩散 一次外延	外延层厚度及杂质浓度可严格控制，较易获得体雪崩特性，动态特性比其它方法制造的好	工艺较复杂，技术要求较高

扩散-合金法是用N型硅片，在一定条件下，扩散镓、硼、铝等P型杂质以形成PNP，然后用合金法制作N型层以形成PNPN四层及各层的欧姆接触，最后引出电极。这种方法工艺简单，因此在可控硅元件发展的初期得到了广泛的应用，迄今仍是制造可控硅元件的主要方法之一。

全扩散法与扩散-合金法不同之处是PNPN三个结全由扩散法形成，这种方法工艺较复杂、流程较长，但可以藉助氧化、光刻等技术制造结构复杂、性能良好的元件。所以是目前大力推广应用的方法。

扩散-外延法与扩散-合金法不同之处是第四层即N层是用外延方法制成，采用这种方法容易得到体雪崩特性和优良的动态特性，但技术要求高，随着外延技术的改进，无疑是发展方向之一。

据报导,美国也有用全外延工艺制造可控硅元件的,但由于外延层之间相互的干扰等问题未解决,所以,目前未用于生产的产品上。

在PN结制法获得解决之后,其后的试制及研究工作主要是集中在如何提高电流容量、提高电压和改进动态特性即开关时间、电流上升率、电压上升率等方面。

1. 提高电流容量的途径

采用大直径硅片增加阴极面积在一定程度上可以提高电流,因此可控硅元件的管芯直径逐年增大,见表14。

表14 可控硅元件管芯直径的发展过程

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

但是,从图7可以看出,增大硅片直径不是一个积极的方法,如螺栓型元件的电极面积从300毫米²增加到600毫米²即二倍,而电流只从200安培增加到300安培即1.5倍;如电极面积增加到1000毫米²,为3倍多,而电流增加到400安培,为2倍,这是由于PN结的面积增大散热条件不好,使电流不能按比例地增加。因此,必须采用积极的方法即提高电流密度的方法来提高电流。于是,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,电流容量比单面冷却的螺栓型结构增加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、氟里昂冷却或热导管冷却,可使电流容量成倍增加,经过这些改进,可控硅元件的最大电流可达2000安。

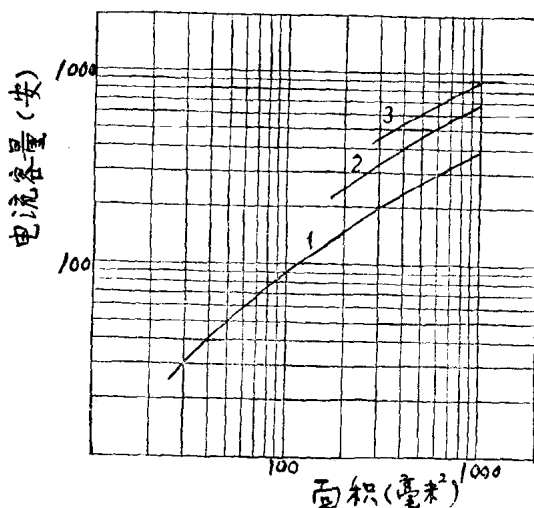


图7 可控硅元件的阴极面积和电流容量的关系
1.螺栓型(风冷);2.平板型(强迫风冷);3.平板型(水冷)

2. 提高电压的途径

欲提高元件的电压,除采用高电阻率、低位错密度、高寿命、均匀单晶和扩散技术制造PN结,以获得体雪崩击穿电压外,另一重要途径是,改变表面结构以降低表面电场,使表面电场低于体内电场,保证体击穿来提高电压。

1962年美国通用电气公司发表磨角解析,证明PN结的表面磨成斜面后,可减弱表面电场,于是开始将管芯表面磨成斜面,见图8-1。对于1000伏以上的元件,开始采用正斜角 α_1 和负斜角 α_2 的二级斜角法,见图8-2。所谓正斜角是面积由高浓度侧向低浓度侧方向减少;负斜角是面积由低浓度侧向高浓度侧方向减少。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,这不仅在制造上有困难,而且阴极面积损失太大不很经济,于是在1969年日本采用双正斜角法,见图8-3,使电压提高到4000伏以上。

3. 改进动态特性的途径

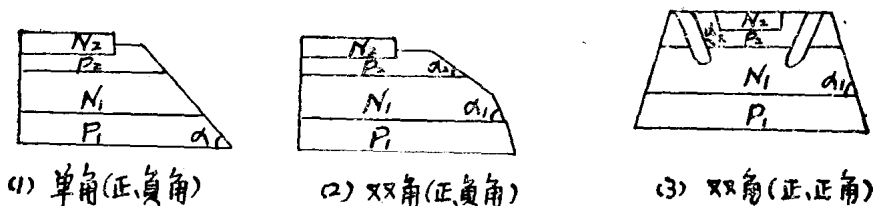


图8 磨角后的各种表面形状

改进动态特性主要是提高电压上升率 (dv/dt) 和电流上升率 (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(图9), 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过 J_s 结, 只有当位移电流流过短基区(P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, 采用这种结构可以获得 1000伏/微秒 的电压上升率。

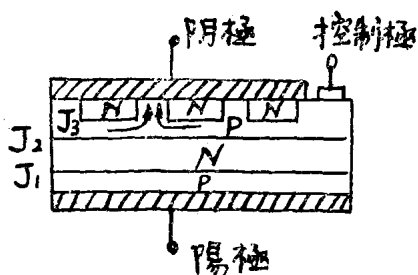


图9 发射极短路结构

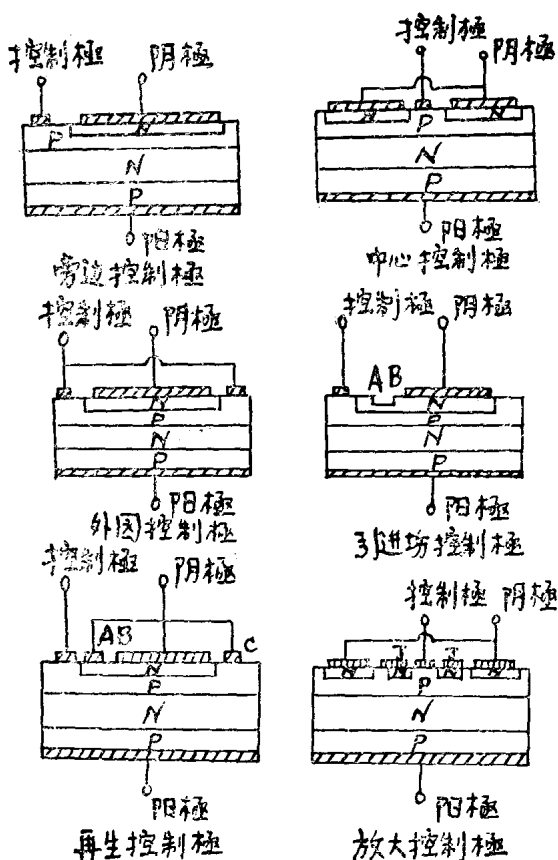


图10 各种控制极结构

提高电流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的初始导通面积及加速导通面积的扩展。控制极开始为月牙控制结构, 其后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, 有了新的含意, 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点与若干个名叫再生控制极的C点相连，当触发后A点导通，电位上升到阳极电位，而与A点相连接的C点的电位也都提高到阳极电位，促使阴极更快地导通；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，此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，采用以上各种结构，可使电流上升率提高到1000安/微秒。

缩短关断时间的主要方法是采用对长基区（N区）掺金（金扩散法）以降低长基区少子的寿命。最近报导采用控制复合中心的分布密度和能级，可以降低少子寿命而不显著增加正向压降。其它如高能粒子轰击也能降低少子寿命，但不易掌握，所以尚未用于生产。

4. 在封装方面的改进

管壳结构经历了金属-玻璃密封、金属-陶瓷密封和金属-塑料密封等几种型式的逐步发展过程，主要目的是提高管壳的机械强度和绝缘性能，以保证管壳的气密性能并能承受高电压。金属-玻璃密封工艺较简单，机械强度较差，是小容量元件广泛采用的一种方法；金属-陶瓷密封工艺较复杂、机械性能较好，用于大容量高电压元件；金属-塑料封装目前大多用于小容量元件，在大容量元件方面应用尚不多，但是由于塑料成本低、工艺简单、成型方便，无疑是发展方向。

管壳与管芯之间的接触，经历了软焊、硬焊和压接触三种方式，主要目的是消除不同金属间接触时所产生的热疲劳。软焊是采用低熔点焊料如银-铅-锡焊料进行焊接，此法工艺简单，但是使用过程中经过几千次热循环就会发生热疲劳，使元件的性能降低，甚至损坏，所以只适用于小容量元件；硬焊是采用高熔点焊料如银-铜-锌-镉-镍焊料进行焊接，虽工艺复杂、成本高、要求非常仔细地焊接才能获得可靠的接触，但此法焊接的元件热循环次数高（1万次以上）；压接触分内压接（螺栓型）和外压接（平板型）两种，是利用弹簧的压力将管芯压紧，借助弹簧的弹力，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。

表15是将历年来结构上改进的简单归纳。

表15 可控硅元件结构方面的改进年表

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（正、负角）表面结构	提高电压	美国通用电气公司
1964	内压接式结构	消除热疲劳	西德西门子公司
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	外压接结构（平板型结构）	提高电流	西德西门子公司
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

（三）可控硅元件的生产概况

经过工艺和结构等方面各种的改进，使可控硅元件的生产迅速发展起来，在资本主义国家中，日、美的产量发展较快，表16为1962年以来日、美两国可控硅元件的产量和产值。

表16 1962年以来，美、日可控硅元件的产量和产值

年 份 (年)	日 本		美 国		年 份 (年)	日 本		美 国	
	产 量 (千个)	产 值 (百万日元)	产 量 (千个)	产 值 (百万美元)		产 量 (千个)	产 值 (百万日元)	产 量 (千个)	产 值 (百万美元)
1962	—	—	1400	15	1968	4023	—	32964	59.7
1963	—	—	1800	21	1969	8245	6819	—	65.2
1964	—	—	—	25	1970	15645	10352	44417	69.8
1965	1059	1164	—	33	1971	14815	7886	45363	98.2
1966	1151	1475	18300	39	1972	19170	7377	—	89.4
1967	1844	5142	25367	56.1					

注：1.日本自1965年才开始单独统计可控硅元件

2.产量、产值是从100毫安可控硅元件开始统计的。

从表 16 可以看出，在六十年代，产量和产值是逐年上升的，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。显而易见，产值比产量增长的速度慢，其主要原因是元件的单价逐年下降。

随着生产的发展，产品水平也逐年提高，日本可控硅元件的电流、电压逐年提高的情况见图 11。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。

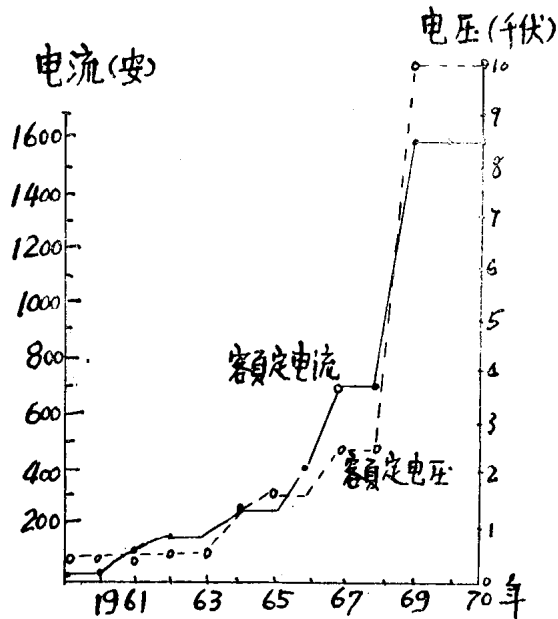


图11 日本可控硅元件电流、电压的发展情况

其它资本主义国家如美、英、西德、瑞士等国也有相应的发展，如美国 1958 年为 1 安 200 伏，1965 年为 500 安 1300 伏，1968 年为 1000 安 2800 伏。现将它们目前达到的生产水平列于表 17。

表17 各资本主义国家可控硅元件的生产水平

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
	东 芝	SF100EX22	1000	2500	平板型
		86077-4000	800	4000	平板型
	三 菱	FT1000A	1000	2500	平板型
		SF800A	600	4000	平板型
美 国	GE	C600PB	1400△	1200	平板型
		C602LE	940△	2500	平板型
	IRC	470PA170	850	1700	平板型
	WH	286-Y30	300	2000	螺栓型
		270ZH	550	1400	螺栓型
	WH	458T25	1180	2500	平底型
		444T30	930	3000	平底型
		71T40	400	4000	平底型
瑞 典	ASEA	YST801SP18K2	1000	1800	平板型
西 德	AEG	T175N2600	230△	2600	平板型
		T302N1500	370△	1500	平板型
	Siemens	BSTPO5110	1000	1600	平板型
	BBC	CS200-27 ₁₀₂	135	2700	平板型
瑞 士	BBC	CS401-25 ₁₀₁	400	2500	平板型
		CS500-16	500	1600	平板型

注：△为有效值

(四) 可控硅元件的可靠性

在一定量的生产数量的基础上，并经过一段时间的使用才有可能统计可控硅元件的可靠性。如日本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）大约用了8000只元件，在使用过程中对发生故障的元件进行逐个登记并分析故障的原因，发现其中有46只发生故障，由此统计出的元件平均故障率为 $7.7 \times 10^{-4}/1000$ 小时，也即是使用了1000小时后有 7.7×10^{-4} 个元件发生故障；又日本在1967年制成一台750伏4500千瓦板坯机用大功率可控硅变流器和总功率为2200千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1007个，大功率可控硅的现场故障率为 $3 \times 10^{-5}/1000$ 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通过两项措施：

第一项措施是保证生产环境的清洁度

实验证明小绝缘颗粒（直径 $<2000\text{\AA}$ ）会引起微等离子击穿和噪音，较大颗粒能引起沟道效应和局部破坏性击穿，所以国外生产半导体器件的车间的清洁度，大多采用美国标准，见表18，共分三级，但在实际使用过程中还有中间等级，一般100级用于集成电路等微型器件的扩散、光刻和所有制版工序；1000级用于功率器件的扩散、光刻工序；10000级用于抛光、中测、封装等工艺。

表18 美国联邦标准 N209a 清洁室标准

级 别	粒 径 (微米)	允 许 含 尘 量	温 度 $^{\circ}\text{C}$	湿 度 %
100	≤ 0.5	100个/英尺 ³ (3.5个/升)	22.2 ± 2.8	最高45
10000	≤ 0.5	10000个/英尺 ³ (350个/升)	22.2 ± 2.8	最低30
100000	≤ 0.5	160000个/英尺 ³ (3500个/升)	22.2 ± 2.8	误差10

清洁室视工艺要求采用全部空气净化和局部空气净化两种方法，但由于大面积净化厂房的防尘措施比较复杂，单位面积造价很高，同时对人身及厂房内物件的净化要求也很严格、维护管理比较困难，因此近几年来，国外很重视净化工作台，以造成局部洁净满足工艺要求。

第二项措施是对产品进行严格的可靠性试验

以日本 FT500 A 型可控硅元件为例，为提高元件的可靠性所进行的可靠性试验项目达18项之多，它们的试验项目及试验条件见表 19。

表19 日本 FT500A 型 (400 安 3000 伏) 可控硅元件的可靠性试验

试 验 项 目	试 验 条 件
电流上升率试验	$V_{AK} = 1200\text{ 伏}$ $di/dt = 200\text{ 安/微秒}$, $I_f = 400\text{ 安}$
过电流试验	$I_p = 8000\text{ 安}$ (半周), 极限试验 $I_p = 10000\text{ 安}$ 1~5 赫
压接负重试验	求 V_T , Q_{jf} 的饱和点
振动试验	振动次数 200 次, 振幅 1.5 毫米, XYZ 三方向各 64 小时
振动通电试验	$I_a = 80\text{ 安}$ 自然冷却温度 $T_j = 125^{\circ}\text{C}$, 振动条件同上, 各方向 32 小时
温度循环试验	-40°C (30 分) $\sim 25^{\circ}\text{C}$ (10 分) $\sim 150^{\circ}\text{C}$ (30 分) 作一循环, 共 300 次
热冲击试验	在 0°C 冷水浸 10 分钟, 立即浸入 100°C 开水中作一循环, 共 50 次
耐湿试验	$T_a = 65^{\circ}\text{C}$, 95% 湿度中存放 100 小时
盐水喷雾试验	$T_a = 35^{\circ}\text{C}$, 5% (重量) 盐水中喷雾中存放 48 小时
低温导通试验	$T_a = -40^{\circ}\text{C}$, 通 2 分钟 400 安电流后关断, 自然冷却, 使用散热器, 500 小时
连续通电试验	连续通 $I_{ar} = 400\text{ 安}$ 电流 ($T_j = 125^{\circ}\text{C}$), 风冷, 1000 小时
短期寿命试验	通 $I_{ar} = 400\text{ 安}$, 1 分 40 秒内达 $T_j = 125^{\circ}\text{C}$, 2 分钟内关断, 风冷 500 小时
长期寿命试验	*上述条件, 2000 小时
高温存放试验	$T_a = 155^{\circ}\text{C}$ 环境中存放 500 小时
低温存放试验	$T_a = -45^{\circ}\text{C}$ 的环境中存放 500 小时
通电加热的老化试验	$T_a = 125^{\circ}\text{C}$, 加交流额定电流 1500 小时
开关循环试验	装上水冷散热器, $I_a = 600\text{ 安}$ 导通 1 秒 ($T_j = 125^{\circ}\text{C}$) 关断 4 秒, 5 万次
氮检漏	10^{-8} CC/s 以下