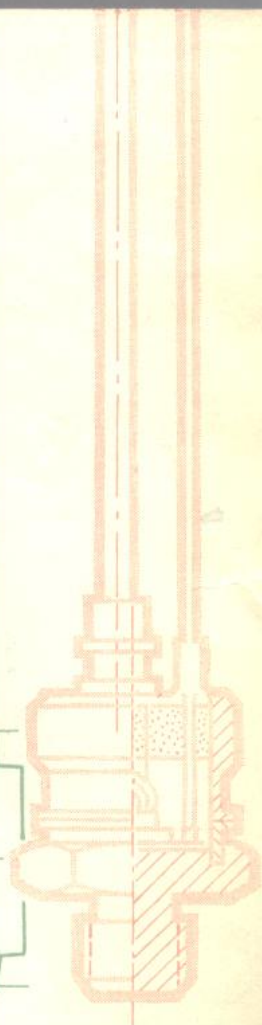
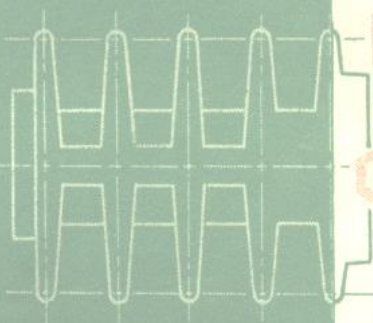


可控硅整流器工艺设计手册

第一机械工业部整流器研究所 编



海人民出版社

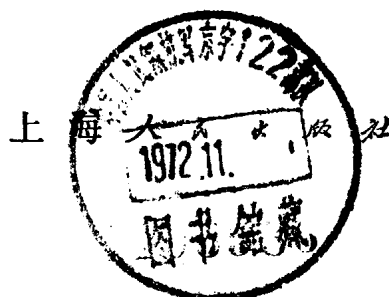


73.4551a

627

可控硅整流器工艺设计手册

第一机械工业部整流器研究所



内 容 简 介

本手册收集了国内外制造可控硅整流器等硅功率器件的工艺设计方法,其中包括材料的机械加工、清洁处理、腐蚀、扩散、氧化与光刻、合金、电镀与蒸发、表面处理与保护等常用公式、曲线、数据及图表。

本手册还简述了可控硅整流器及其派生器件、触发器件的基本原理、特性与结构等,并介绍了器件外壳、散热器设计的一般考虑及器件的测试原理等。

在附录中给出了常用材料特性及它的安全使用、热电偶温度-毫伏当量表、余误差函数表及硅功率器件的实用测试线路等。

本手册可供硅功率器件制造、研究部门的广大工人、技术人员作参考书用。

可控硅整流器工艺设计手册

第一机械工业部整流器研究所

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海中华印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 9 字数 216,000

1972年9月第1版 1972年9月第1次印刷

书号: 15·4·238 定价: 0.59 元

毛主席语录

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

路线是个纲，纲举目张。

要把一个落后的农业的中国改变成为一个先进的工业化的中国，我们面前的工作是很艰苦的，我们的经验是很不够的。因此，必须善于学习。

前 言

在毛主席无产阶级革命路线的指引下，我国半导体器件的生产迅速向前发展，新的品种不断增加，促进了电子技术在整个国民经济中更好地发挥作用。

可控硅由于能以微小的电流控制大功率的机电设备，因而成为工业实现自动化的一个重要元件。它的问世，使半导体元件从弱电领域跨入了强电领域，给强电技术的改革和发展创造了十分有利的条件。另外，由于它还具有体积小、重量轻、效率高、寿命长、使用维护方便等显著特点，因而广泛地应用在矿山、冶金、机电、燃化、轻纺、交通以及国防等工业部门。

把可控硅用于轧钢机的直流传动系统上，代替原来的直流变流机组，提高了轧钢速度，消除了工作环境的噪音，设备的体积和重量大为减小，操作维护也很方便。

在电弧炉炼钢中，用可控硅自动控制电极升降，代替原来的手工配电，不仅缩短了熔炼时间，提高质量，节省电力，而且大大减轻了工人的劳动强度。

随着可控硅在国民经济各部门的广泛应用，不仅要求供给数量更多的元件，而且对元件的质量要求也日益提高。其中最突出的一点就是希望可控硅有更大的额定电流，同时具有更高的耐压。大容量化已成为可控硅研制中的一个重要课题。

为了提高和推广可控硅等硅功率器件的工艺设计水平，本手册收集了有关硅功率器件的设计资料，按照毛主席关于“洋为中用”的教导，我们也收集了一些国外资料，供读者参考。由于我们

学习马克思主义、列宁主义、毛泽东思想很不够，又缺乏实际经验，因而本手册内一定存在很多不当之处，恳请读者批评指正。

目 录

第一篇 硅功率元件的一般介绍

第一章 硅整流元件	1
1.1 硅整流元件的整流特性	1
1.2 硅整流元件的特性参数	2
1.2.1 正向电流	3
1.2.2 正向压降	3
势垒压降; 体压降; 接触压降	
1.2.3 反向电流	5
1.2.4 反向击穿电压	5
雪崩击穿电压; 穿通电压	
第二章 可控硅整流元件	15
2.1 可控硅整流元件的工作原理	15
2.2 可控硅整流元件的特性参数	18
2.2.1 正向电流	19
2.2.2 正向转折电压与反向击穿电压	19
2.2.3 正向压降	28
势垒压降; 体压降	
2.2.4 开关特性	30
导通时间(开通时间); 电压上升率; 电流上升率; 关断时间; 开关损耗	
2.3 各项参数的综合考虑	36
电阻率; 厚度; 直径; 寿命; 位错及其他因素; 阴极(N_2)和短基区(P_2)浓度比	
第三章 可控硅整流元件的派生元件及触发元件	40
3.1 可控硅整流元件的派生元件	40
3.1.1 可关断可控整流元件(GTO)	40
3.1.2 $P-N-P-N$ 光开关(光可控元件)	41
3.1.3 硅双向元件	42
3.1.4 可控硅开关(SUS)	44

3.1.5 反向导通可控硅元件	44
3.2 触发元件	45
3.2.1 单结晶体管(UJT)	45
3.2.2 互补单结晶体管(CUJT)	45
3.2.3 $P-N-P-N$ 开关二极管	46
3.2.4 硅触发二极管(Diac)	46
3.2.5 硅单向开关(SUS)	47
3.2.6 硅双向开关(SBS)	47

第二篇 管 芯 工 艺

第四章 管芯工艺概貌	49
4.1 硅整流元件的管芯工艺	49
4.1.1 合金法	49
4.1.2 扩散-合金法	49
4.1.3 全扩散法	50
4.2 可控硅整流元件的管芯工艺	50
4.2.1 扩散-合金法	50
4.2.2 全扩散法	51
4.2.3 外延法	52
第五章 硅片的机械加工	53
5.1 硅棒切片	53
5.2 硅片割圆	54
5.3 硅片研磨	55
5.4 硅片抛光	56
第六章 材料的清洁处理及腐蚀	57
6.1 硅的腐蚀	57
6.2 硅扩散片的电解腐蚀	59
6.3 常用金属及合金的腐蚀	59
6.4 玻璃器皿的清洁处理	61
6.5 石英器皿的清洁处理	61
6.6 石墨模具的清洁处理	61
6.7 钼片的清洁处理	61
第七章 扩散	62
7.1 概述	62
7.2 常用的几种扩散方式	64

7.2.1	闭管扩散	64
7.2.2	载运气体扩散(开管扩散)	65
7.2.3	涂层扩散	65
7.2.4	箱法扩散	66
7.2.5	二步扩散法	66
7.3	硅的扩散技术	67
7.3.1	<i>P</i> 型杂质的扩散	67
	硼扩散; 铝扩散; 镓扩散	
7.3.2	<i>N</i> 型杂质的扩散	75
	磷扩散; 锑扩散	
7.3.3	两种杂质同时扩散	78
	同型杂质同时扩散; 异型杂质同时扩散	
7.3.4	其他杂质的扩散及吸收	78
	金扩散; 杂质吸收	
7.4	扩散参数	80
7.4.1	影响结深的一些因素	80
7.4.2	表面杂质浓度	83
7.4.3	扩散系数与硅基片杂质浓度和表面浓度的关系	85
7.4.4	扩散层的电学特性	87
7.5	结深及表面杂质浓度的测定	87
7.5.1	结深的测定	87
	磨斜角及磨槽法; 染色显示 <i>P-N</i> 结; 测定	
7.5.2	表面浓度的计算及测量	89
	硅单晶电阻率的测量; 薄片电阻率的测量; 薄层电阻(方块电阻); 硅中杂质浓度与电阻率的关系; 扩散层平均电导率与表面浓度的关系; 表面浓度的计算	
第八章	氧化与光刻	110
8.1	硅片的氧化	110
8.1.1	杂质在二氧化硅中的扩散系数	110
8.1.2	硼、磷扩散时二氧化硅层的掩蔽作用	111
8.1.3	二氧化硅层的生长方法	112
	干氧化法; 湿氧化法; 水汽氧化法; 热分解沉积氧化层; 干、湿氧交替氧化法	
8.1.4	热氧化引起杂质再分布	117
8.1.5	氧化层测量与检查	118
	氧化层厚度的测量; 氧化层连续性的检查	
8.2	光刻	120
8.2.1	光刻胶	120

8.2.2	二氧化硅腐蚀	121
8.2.3	光刻时蒸发铝膜的腐蚀	122
第九章	合金	123
9.1	相图	123
9.1.1	相图的一般特性	123
9.1.2	硅的二元相图	127
9.1.3	其他常用二元相图	135
9.2	合金 $P-N$ 结	142
9.3	合金欧姆接触	143
9.4	合金材料	144
9.4.1	$P-N$ 结合金属材料 and 欧姆接触合金材料	144
9.4.2	管芯焊接常用合金材料	146
9.5	合金温度(烧结温度)	146
9.6	合金深度(结深)的计算	148
9.7	合金结深度的测量	150
第十章	电镀与蒸发镀膜	151
10.1	电镀与化学镀	151
10.1.1	硅片镀镍	151
10.1.2	钼片镀镍	152
10.1.3	钼片镀银	152
10.1.4	管壳及钢件镀镍	153
10.1.5	管壳及钢件镀铬	155
10.2	蒸发镀膜	156
10.2.1	电子束蒸发	157
10.2.2	真空加热蒸发	157
第十一章	表面处理和保护	160
11.1	表面处理	160
11.1.1	磨角	160
	正斜角; 负斜角	
11.1.2	表面化学腐蚀	163
	硷腐蚀法; 酸腐蚀法	
11.2	表面保护	164
11.2.1	溅射二氧化硅保护膜	164
11.2.2	氢氟酸-硝酸系蒸气形成氧化保护膜	165
11.2.3	酸蒸气处理后追加有机硅烷处理形成钝化膜	166
11.2.4	表面保护涂敷物	167

第三篇 管壳及散热器

第十二章 管壳结构及制造工艺	168
12.1 管壳结构和工艺概貌	168
12.2 管壳设计的一般要求	171
12.3 管壳零部件的设计及加工	171
12.3.1 底座	171
材料选择;结构尺寸;加工方法	
12.3.2 内引线的断面积和形状	173
12.3.3 外引线的断面积和形状	176
12.3.4 引入体(管帽)	179
12.4 引入体金属与非金属的封接	181
12.4.1 陶瓷与金属封接	181
难熔金属法;活性金属法;材料处理;陶瓷金属化及封接工艺	
12.4.2 玻璃与金属封接	183
匹配式玻璃与金属封接;非匹配式(压缩式)玻璃与金属封接	
12.4.3 塑料封装	184
12.5 底座与引入体的封接	184
第十三章 散热器	186
13.1 设计的一般考虑	186
13.2 材料的选择及加工	190
13.2.1 材料的选择	190
13.2.2 加工	191

第四篇 硅功率元件的测试

第十四章 测试方法一般介绍	193
14.1 直流法	193
14.2 全动态法	193
14.3 半动态法	194
14.4 电表直接读数法	195
14.5 示波器直接读数法	196
14.6 光点跟迹法	196
第十五章 硅整流元件的测试	198
15.1 正向电压降及结温升的测试	198
15.1.1 结温升的测试	198

15.1.2 正向电压降的测试	199
15.2 反向伏-安特性的测试	200
15.2.1 硬特性元件的测试	201
15.2.2 软特性元件的测试	201
15.2.3 异常特性元件的测试	202
第十六章 可控硅整流元件的测试	204
16.1 正、反向伏-安特性(阻断状态)的测试	204
16.2 正向电压降及结温升的测试	205
16.2.1 触发线路	205
自行触发线路; 外电源触发线路	
16.2.2 热敏电流的选取	206
16.2.3 全动态法测量热敏电压降	207
16.3 控制极特性的测试	208
16.4 维持电流的测试	209
16.5 开关时间、电压上升率、电流上升率的测试	210
16.5.1 基本定义	210
开通时间; 关断时间; 电压上升率; 电流上升率	
16.5.2 测试方法	212
开通时间; 关断时间; 电压上升率; 电流上升率	
第十七章 硅双向可控元件的测试	215
17.1 伏-安特性的测试	215
17.2 控制极特性的测试	216

附 录

附录一 常用材料的性质及它的安全使用	217
附 1.1 常用材料的性质	217
附 1.1.1 硅的各种性质	217
附 1.1.2 杂质元素在硅中的性质	218
附 1.1.3 常用元素的主要性质	219
附 1.1.4 常用气体的基本物理化学性质及其纯化材料	221
附 1.1.5 低温材料	223
附 1.1.6 真空材料	224
附 1.1.7 电热材料	225
附 1.1.8 磨料	229
附 1.1.9 玻璃与石英玻璃	230
附 1.1.10 树脂	231

附 1.1.11	塑料	232
附 1.1.12	有机硅高聚合物	235
附 1.1.13	常用化学试剂	236
附 1.1.14	离子交换树脂	243
附 1.1.15	去离子水	244
附 1.1.16	王水	248
附 1.1.17	洗液	248
附 1.2	常用材料的安全使用	248
附 1.2.1	有机溶液的安全使用	248
附 1.2.2	酸和硷的安全使用及急救	249
附 1.2.3	气体的安全使用	250
附录二	热电偶温度-毫伏当量表	252
附录三	三角函数表及余误差函数表	262
附录四	硅功率元件实用测试线路图	265

第一篇 硅功率元件的一般介绍

第一章 硅整流元件

硅整流元件是利用 $P-N$ 结的整流特性, 以半导体硅为主体而制成的一种固态整流元件。它的基本结构、符号及电压-电流特性 (简称伏-安特性) 见图 1.1。

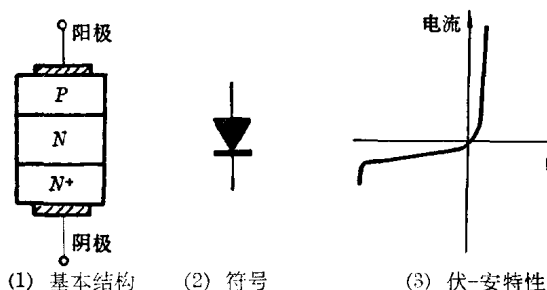
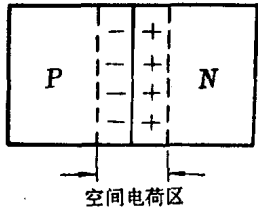


图 1.1 硅整流元件的基本结构、符号及伏-安特性

1.1 硅整流元件的整流特性

硅整流元件的核心是 $P-N$ 结。 $P-N$ 结具有整流作用, 是由于 P 型层的空穴 (多数载流子, 简称多子) 浓度高于 N 型层的空穴 (少数载流子, 简称少子) 浓度, N 型层的电子 (多子) 浓度高于 P 型层的电子 (少子) 浓度; 这一浓度差使 $P-N$ 两层交界处 P 型层的空穴向 N 型层扩散, N 型层的电子向 P 型层扩散, 于是在交界处附近的 P 型层因缺少空穴而带负电荷, N 型层因缺少电子而带正电荷, 形成电场。这一电场阻止空穴继续向 N 型层扩散, 电子继续向 P 型层扩散, 并使扩散达到动态平衡 (这时的电荷区叫空

间电荷区,又叫阻挡层、耗尽层、空间电荷层等,见图1·2)。



当在 $P-N$ 结上加正向电压 (P 端接正, N 端接负) 时, 所加电压方向与空间电荷区中的电场方向相反, 削弱了原来的电场, 有利于扩散, 于是就有大量空穴向 N 区、电子向 P 区流动, 直至达到新的平衡。

图1·2 $P-N$ 结空间电荷区 这外加电压促进了载流子的流动。由于 P 区和 N 区内多子的贮存量很大, 所以在 $P-N$ 结上稍加电压, 就会引起电流大量增加, 电流密度可达几十安/厘米²至千安/厘米²。

相反, 在 $P-N$ 结上加反向电压 (P 端接负, N 端接正) 时, 所加电压方向与空间电荷区中的电场方向相同, 它加强了原有的电场, 进一步阻止空穴向 N 区、电子向 P 区流动, 这外加电压起了阻止多子流动的作用。但是, 在加反向电压时, 电场方向使 N 区的少子流向 P 区、 P 区的少子流向 N 区, 由于 P 区和 N 区的少子贮存量很少, 所以在反向电压逐渐加大时, 开始电流随电压有所增加, 随后电流不再随电压增加, 而出现饱和状态, 即所谓反向饱和电流。此电流密度一般只有几微安/厘米²。由此, $P-N$ 结的伏-安特性就出现了一种整流特性, 见图1·1。这种整流特性可简单地用数学式(1·1)表示:

$$I = I_0 [\exp(qV/kT) - 1] \quad (1.1)$$

其中 I_0 为反向饱和电流; q 为电子电荷; k 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度。

由(1·1)式可知, V 为正时 I 很大, V 为负时 I 很小, 又 I 随 T 的增加而减小。

1.2 硅整流元件的特性参数

硅整流元件的优劣, 主要由正向电流、正向压降、反向电流、反

向电压等特性参数表示。

1.2.1 正向电流

正向电流随 $P-N$ 结的结面积增大而增大, 所以提高电流的直观方法是加大 $P-N$ 结的面积。但是, 随着电流增大, 电流密度减小, 如小电流元件, 电流密度可达千安/厘米², 大电流 200 安元件, 电流密度在 100 安/厘米² 左右。这是由于结面积加大后, 在结中间部分所产生的热量不易传出, 降低了电流密度。由此可见, 单纯地加大结面积不是积极的方法, 提高电流容量的积极方法是提高电流密度, 如减小正向压降、改进散热条件、设计良好的散热器、用二面散热的平板结构代替一面散热的螺栓结构, 用水冷、油冷、化学沸腾冷却剂代替风冷等。

1.2.2 正向压降

正向压降是硅整流元件的重要参数之一。一般正向功率损耗可简单地看成通过 $P-N$ 结的电流和降在 $P-N$ 结上的电压的乘积, 也就是说, 对于一定的功率损耗, 如降在元件上的正向电压愈小, 则能通过的电流愈大, 也就是愈能提高元件的电流容量。

正向压降由三部分组成, 即势垒压降(在 $P-N$ 结上的压降)、体压降(在硅基片上的压降)及接触压降。

1. 势垒压降: 一个正向良好的硅整流元件, 体压降和接触压降都很小。对于常用的 $P-N-N^+$ (N^+ 为重掺杂区) 结构, 在电流极小时, 势垒区的复合电流起主要作用, 其电流与电压的关系为:

$$I \propto \exp(qV_j/2kT) W_D \quad (1.2)$$

其中 V_j 为势垒压降; W_D 为正向时的势垒区宽度。

当电流稍增加, 但仍保持小注入*时, 电流与电压的关系为:

* 所谓小注入, 是指注入的少子比被注入区的多子少得多。例如, P 区注入 N 区的空穴数比 N 区中的电子数少得多。

$$I \propto \exp(qV_j/kT) \quad (1.3)$$

当电流继续增加而达到大注入*时, 电流与电压关系为:

$$I \propto \exp(qV_j/2kT) \quad (1.4)$$

当电压增加到近似等于 $P-N$ 结的零偏压势垒电压时, 就进入了所谓空间电荷限制电流的区域。此时的电流与电压关系为:

$$I \propto V^2 \quad (1.5)$$

势垒压降与半导体材料有关, 如硅元件的势垒压降约为锗元件的一倍。

2. 体压降: 制造硅整流元件, 一般都采用高阻硅材料, 由它引起的体压降应很大, 但由于电导调制作用, 可使硅整流元件的体压降减到很小的程度。

对于具有 $P-N-N^+$ 结构的硅整流元件, 当有大电流通过 $P-N$ 结时, P 区就有大量空穴注入到 N 区, 由于复合作用, 注入的空穴浓度随进入 N 区距离的增大而减少。从注入处到浓度降为 $1/e$ 处的距离叫扩散长度(L_p)。在 N 区 L_p 的距离内, 由于有了空穴的积累而带正电荷, 为在半导体内保持电中性(空间电荷区除外), 必须从 N^+ 区注入等量的电子, 以满足电中性要求。 N 区内注入了大量电子以后, 大大提高了原基片的电导率, 使体压降下降到可以忽略的程度。这种电导率的改变叫电导调制作用。在有电导调制作用时, 压降就与所用材料的电阻率无关。为具有良好的电导调制作用, 要求 N 区的厚度 $W \leq L_p$, 在 $W > L_p$ 区域内, 电导调制作用减弱, 体压降显著增加。所以, 在工艺上必须要求:

(1) 在满足电压要求下, 尽可能减薄基区厚度(亦即减薄原始硅片的厚度)。

(2) 提高原始硅片内少子的寿命, 如选用高寿命、晶格完整的原材料, 在制造工艺中采用慢冷却、杂质吸收等方法。

(3) 提高 N^+ 层和 P 层的浓度, 以保证能注入足够的电子。

* 所谓大注入, 是指注入的少子等于或大于被注入区的多子。