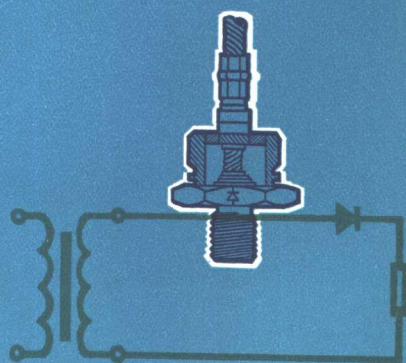
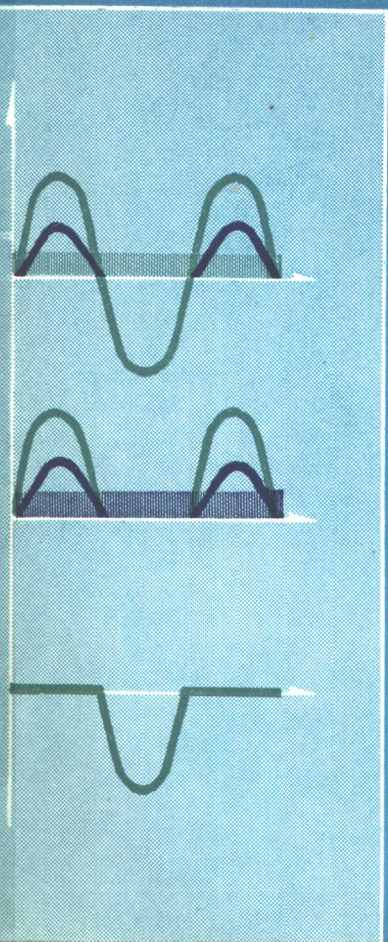


大功率硅整流器



冶金工业出版社

大功率硅整流器

上海市公共交通公司电车轨线所 编

冶金工业出版社

大功率硅整流器同水銀整流器相比較，具有整流效率高、根除汞蒸气对人体的危害、減少运行维护人員、节省大量电能等优点。本书介紹的主要內容是功率較大的硅整流裝置的元件、电路、串并联、保护、設計和运行等。本书讀者对象是从事硅整流技术方面的技术人員和工人。

大 功 率 硅 整 流 器

上海市公共交通公司電車軌棧所 編

*

冶 金 工 業 出 版 社 出 版

新 華 書 店 發 行

北 京 印 刷 七 廠 印 刷

*

开本大 32 印张 $6\frac{13}{16}$ 字数 171 千字

1973年 3 月第一版 1973年 3 月第一次印刷

印数 00,001~25,400 册

統一書号: 15062·3039 定价 (科三) 0.63 元

毛主席语录

领导我们事业的核心力量是中国共产党。

指导我们思想的理论基础是马克思列宁主义。

我们的方针要放在什么基点上？放在自己力量的基点上，叫做自力更生。

要认真总结经验。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

团结起来，争取更大的胜利。

前 言

在毛主席的革命路线指引下，一个伟大的社会主义革命和建设的新高潮蓬勃兴起。随着我国工农业生产的迅速发展，直流电能的应用越来越广泛。为了把三相交流电能转变为适应各种要求的直流电能，对大型硅整流技术提出了新的要求。大功率硅整流器主要应用在铝电解、电化工业和其他工业方面。它同水银整流器相比较，有很多优点。采用水银整流器不但电损耗大，运行、维护复杂，而且汞蒸气挥发损害工人的健康；采用大功率硅整流器可以提高整流效率，根除汞害，减少运行、维护人员，节省大量电能，对于厂矿企业改造陈旧的整流装置、采用新的技术装备起着很大的作用。

我们遵照毛主席关于“**要认真总结经验**”的教导，为了总结并交流采用大功率硅整流器方面的经验，在我所党组织领导下，组织“三结合”小组编写了《大功率硅整流器》一书。书中介绍的主要内容是功率较大的硅整流装置的元件、电路、串并联、保护、设计和运行等。

在编写本书过程中，得到了北京变压器厂、301厂、西安整流器研究所、上海整流器厂、上海燎原化工厂、上海电化厂等单位的大力支持和帮助，谨此一并表示感谢。

由于我们的水平所限，书中缺点、错误之处可能不少，请读者提出批评指正。

编 者

1972年8月

目 录

第一章 二极管整流元件	1
一、结构和整流原理	1
二、正反向伏安特性	5
三、功率损耗	7
四、热阻	9
五、硅元件主要参数的测量	12
六、硅元件的型号、参数	20
第二章 整流电路	24
一、单相半波整流电路	24
二、三相半波整流电路	27
三、三相桥式整流电路	33
四、双反星形整流电路	43
五、整流变压器的电磁不平衡	53
六、变压器电抗及电阻对整流电路的影响	58
七、整流变压器与功率因数	73
本章附录	79
第三章 硅元件串并联	94
一、硅元件并联	94
二、硅元件串联	103
第四章 保护	107
一、过电压保护	107
二、过电流保护	120
第五章 设计	145
一、硅元件数目的确定	145

二、效率·····	151
三、整流柜的通风·····	154
四、整流柜的考虑·····	162
五、设计举例·····	164
第六章 运行·····	194
一、检查维修·····	194
二、故障处理·····	197
三、整流装置的测量·····	198
附录 本书所用符号表·····	205

第一章 二极硅整流元件

在毛主席“独立自主、自力更生”方针的指引下，我国不仅生产了优质大功率的一般二极硅整流元件，而且还生产了雪崩型等比较新型的二极硅整流元件。

二极硅整流元件具有效率高、体积小、重量轻、维护简便等优点，应用比较广泛。但是二极硅整流元件也有它的缺点，如过载能力差（热容量低）、损坏后不可修复等。只要我们充分掌握它的性能，就能克服它的缺点，发挥它的优点，使它在生产上发挥更大的作用。

一、结构和整流原理

二极硅整流元件（简称硅元件或元件）有多种型式。从性能上来说有雪崩型及非雪崩型（即一般硅元件）之分；从出线连接方式来说有焊接和压接之分（压接又分内压接和外压接）；从结构型式来说有螺栓型和平板型之分；从密封及绝缘方式上来说又有陶瓷、搪瓷及玻璃型之分；此外，硅元件的散热器根据不同的硅元件结构、冷却方式（风冷、水冷或油冷）而又分不同的型式。

几种不同结构的硅元件的外形如图 1-1 所示。

虽然硅元件有多种不同型式，但是它的整流原理基本上是一样的。下面我们着重介绍螺栓型一般硅元件，如图 1-1(a) 所示。螺栓型硅元件（未附散热器）的一个极是螺栓，另一个极是软连线。电流只能单方向从一个极流经元件，自另一极流出。二极硅元件的符号如图 1-2 所示，通流方向如右侧箭头所示。

下面谈谈硅元件内部的结构和它的整流作用。

图 1-3 是硅元件的结构示意图，其中起整流作用的部分是

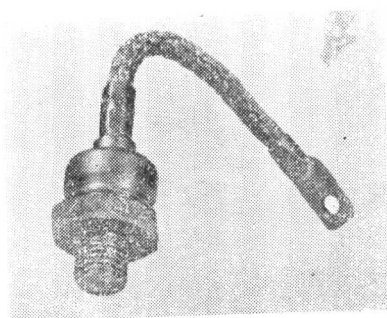


图 1-1(a) 搪瓷絕緣螺栓型硅元件

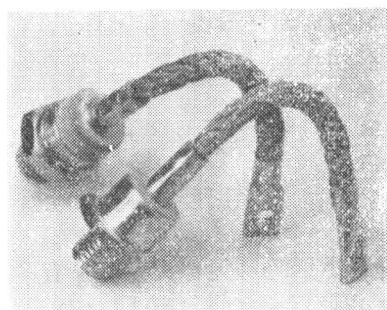


图 1-1(b) 陶瓷絕緣螺栓型硅元件

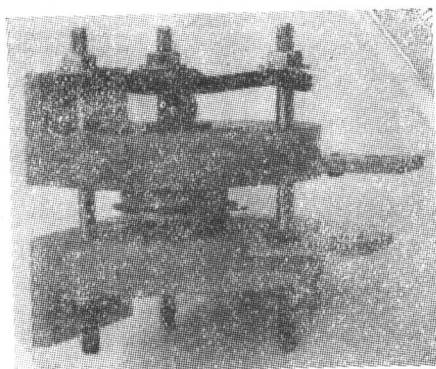


图 1-1(c) 水冷却平板型硅元件

整流结（也称 $P-N$ 结）。空穴或电子型单晶硅片可用合金法、扩散法、扩散合金法等方法在硅片的一面形成 $P-N$ 结，也叫整流结。同时，为了满足欧姆接触、防止热膨胀断裂和便于焊接等要求，还要在表面镀镍、锡，焊上铝片、钼片和金箔等组成管芯；并在管芯经过倒角、清洁处理后，将其上端焊上内部软连线 3，下端焊在基座 1 上，用搪瓷绝缘环 4 使管芯与外界空气隔绝，再将其上面焊上外部软连线 5，这样就组成了一个完整的整流元件。

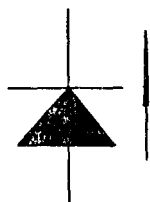


图 1-2 二极管元件的符号

我国目前大功率硅元件一般均采用电子型硅片。不同的工艺，管芯的结构也不同。图 1-4~1-6 是采用合金法、扩散法和双扩散法三种不同工艺所制成的管芯结构图。

为了表示通电方向，元件符号通常刻在元件的基座上。图 1-3 所示元件的通电方向是从螺栓（阳极）流向外部软连线（阴极）。

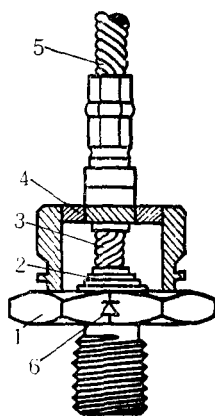


图 1-3 硅元件的结构示意图

1—基座；2—管芯；3—内部软连线；4—搪瓷绝缘环；5—外部软连线；6—元件符号

了解了元件的结构后，再来研究它的整流作用。纯净硅的单方向导电作用是不明显的，但当掺入杂质并形成整流结后，情况就不同了。例如，在电子型硅片的一面，用合金法或扩散法掺入第三族元素的杂质（如铝、硼等），就形成所谓整流结（即 $P-N$ 结）。图 1-7(a) 说明整流结中电子和空穴的分布情况。电子、空穴要相互向对方扩散，

在接触处薄层Ⅰ内积聚了许多电子（负电荷），在薄层Ⅱ内积聚了许多空穴（正电荷），结果形成了一自建电场，它能阻止电子或空穴相互向对方继续扩散，此时电子与空穴处于相对的平衡状态。

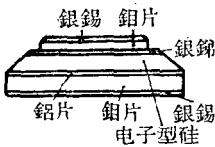


图 1-4 合金法
制成的管芯

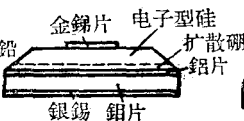


图 1-5 扩散法
制成的管芯

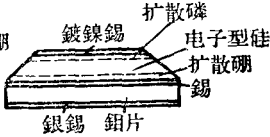


图 1-6 双扩散法
制成的管芯

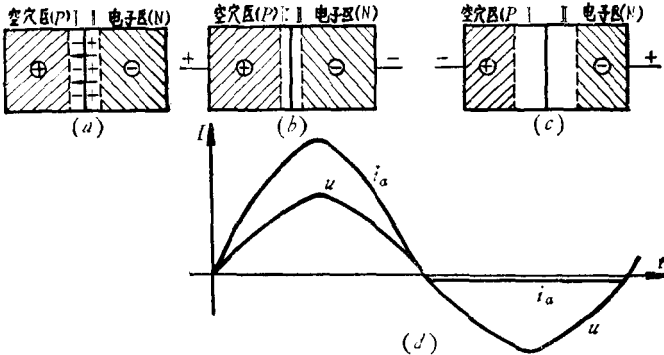


图 1-7 整流结整流作用原理图

(a) 没有外加电压时；(b) 加正向电压时；(c) 加反向电压时；(d) 加正反向电压时电流波形图

如果在整流结两端加上一正向电压如图 1-7 (b) 所示，就使空穴区处在高电位，电子区处于低电位。在这一外加电场作用下，克服了自建电场，使空穴、电子源源不断地向对方流动，穿过交界面的电子、空穴数目多，电流就大，也就是说整流结此时电阻很小，正向导通。

如果在整流结的两端加上一反向电压如图 1-7 (c) 所示，那么，电子区中的电子受正电位吸引移向正端，而空穴区中的空穴

将受负电位吸引移向负端。于是，加厚了整流结，阻止电子与空穴相互向对方扩散。这样，穿过交界面的电子、空穴数目极少，即电流很小，也就是说整流结此时电阻极大，反向闭锁。

由于整流结的作用，使硅元件具有单向导电的性能，即整流作用。加正向电压时流过整流结的电流叫正向电流，加反向电压时流过整流结的电流叫反向电流。

雪崩型硅元件与非雪崩型硅元件的主要区别在于管芯的结构不同。雪崩型硅元件除了在电子型硅片的一面扩散铝、硼等形成一般的整流结（ $P-N$ 结）以外，还要在结的空穴一侧扩散一层空穴密度更大的空穴层（ P_+ ），而在结的电子一侧扩散一层电子密度更大的电子层（ N_+ ）。这样就形成了所谓 P_+PNN_+ 结。关于雪崩型硅元件整流的具体物理过程就不多谈了。

二、正反向伏安特性

通过对硅元件的正反向伏安特性的研究，有助于对它的整流性能作基本的数量分析。当加上正向电压时，硅元件导通，有正向电流通过，但仍有一定阻力，因此有一定正向电压降产生，正向电流和正向电压降的关系称为硅元件的正向伏安特性。同样，当加上反向电压时，硅元件也不是完全闭锁，仍有一定反向漏泄电流通过，反向电压和反向电流的关系称为硅元件的反向伏安特性。

从图的右上方可以看出，当正向电压约在 0.4 伏以下时，正向电流极小，这一段伏安特性曲线基本靠近横座标轴，当正向电压继续增加时，正向电流就急剧上升。为了便于计算，将曲线上对应于元件额定电流的 50% 和 150% 的两点连成一条直线（图 1-8 是额定电流 200 安元件的特性曲线，对应的两点为 100 安和 300 安），这条直线与横座标轴交点的电压值称为正向起始电压；这条直线的斜率的倒数 $\left(\frac{\Delta U}{\Delta I}\right)$ 称为硅元件的等效电阻。这样，我们

就把正向特性曲线近似地简化为一条折线 OAB (在额定电流下, 按此法简化; 在短路状态下, 应按短路电流值来简化)。

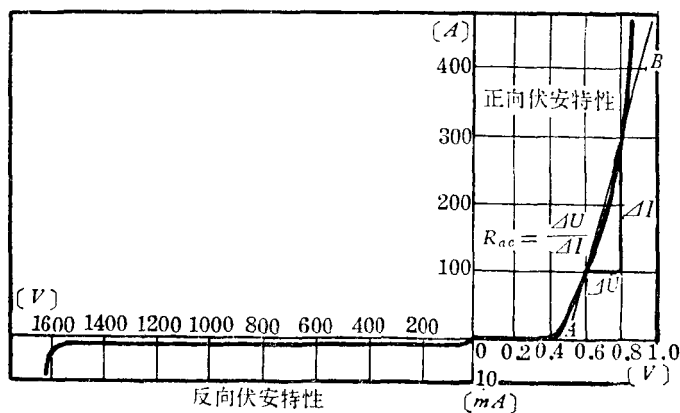


图 1-8 2CZ-200/800型硅元件的正反向伏安特性曲线

当加反向电压时, 特性曲线在图 1-8 的左下方, 此时曲线几乎平直地靠近横坐标轴, 反向漏泄电流很小。如果反向电压达到一定值时, 反向漏泄电流迅速增加, 特性曲线急剧弯曲, 此时的电压峰值 (指测试时所用单相正弦半波电压的峰值) 称为反向最高测试电压峰值。

如果在到达最高测试电压峰值后再继续加大电压, 则硅元件就将发生特性恶化现象或反向击穿。

必须指出: 硅元件的正、反向伏安特性随元件加工工艺的不同而不同。例如采用合金法工艺加工的硅元件, 它的反向特性曲线的弯折点不明显, 如图 1-9(a) 所示, 通常称它具有“软”特性; 采用扩散法工艺加工的硅元件, 它的反向特性曲线的弯折点很明显, 如图 1-9(b) 所示, 通常称它具有“硬”特性。同一加工工艺的各种硅元件的特性也不同, 即使同一型号元件的特性也稍有差异。

一般来说, 正向特性差异较小, 反向特性差异较大。此外,

同一硅元件的特性随着整流结温度（简称结温）的变化而变化，结温升高时，正向特性曲线向左偏移，即正向等效电阻变小，但变化量不大；而反向电流则有显著的增大。

从硅元件的正反向伏安

特性可以看出，在正向通过数百安时正向电压降仅一伏左右，而反向工作峰压能高达几百伏。正由于硅元件具有这种突出的特点，才使它在各种用途的整流装置中被广泛地应用着。

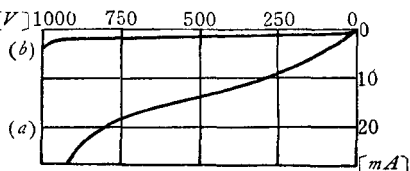


图 1-9 反向特性曲线图

(a) “软”特性；(b) “硬”特性

雪崩型硅元件是采用扩散法工艺加工的，它的反向特性是“硬”特性。雪崩型硅元件的 P_+PNN_+ 四层结构，能使它在反向电压峰值超过其最高反向测试电压时，承受一定的反向功率而硅元件不致损坏。这也是雪崩型硅元件的主要优点。但需要指出的是：反向过电压的持续时间和功率应有一定限度，如果超过了这个限度，硅元件也会损坏。

三、功率损耗

任何器件的效率决定于它本身的损耗。硅元件的效率虽然比汞弧整流器的效率高得多，但是也有一定的功率损耗。从它的正反向伏安特性曲线中，可以看出硅元件在正向导通时，它产生一定的电压降，也就是说存在着一定的功率损耗。此外，在反向闭锁时，也并不是完全闭锁，而是有一定的反向漏泄电流通过，也有较小的功率损耗。因此硅元件的功率损耗就包括正向功率损耗和反向功率损耗二个部分。但由于硅元件反向功率损耗只占正向功率损耗的5~10%（工频情况下），所以一般只考虑它的正向功率损耗。

实际使用时，通过硅元件的电流是断续的周期电流，它是周期性地重复出现；它的幅值、波形和它在一周期中的延续时间等取决于具体的整流线路、负载的大小以及负载的性质。这样一个只占一周期的部分时间并具有一定波形的脉冲电流，通过硅元件时就会产生某一功率损耗，也就是硅元件的正向功率损耗。

从图 1-8 可以看出，硅元件的正向电压降由二部分组成，前段 OA 是一个固定电压降 U_{th} ，换句话说，它的电压降是一个常数；另一段 AB 电压降可设想为由一个阻值很小的电阻 R_{ac} 和流过它的电流 i_v 的乘积。

即硅元件的瞬时电压降 u_{af} 应为：

$$u_{af} = U_{th} + R_{ac} \cdot i_v \quad (1-3-1)$$

硅元件的正向功率损耗一周内的平均值 P_v 可由下式求出：

$$\begin{aligned} P_v &= \frac{1}{T} \int_0^T u_{af} \cdot i_v dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T (U_{th} + R_{ac} \cdot i_v) i_v dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T U_{th} i_v dt + \frac{1}{T} \int_0^T R_{ac} i_v^2 dt \\ &= U_{th} \cdot I_v + R_{ac} \cdot I_{R \cdot M \cdot S}^2 \end{aligned} \quad (1-3-2)$$

式中： I_v ——流过硅元件电流的平均值，安；

$I'_{R \cdot M \cdot S}$ ——流过硅元件电流的均方根值（有效值），安；

T ——周期时间，工频时为20毫秒；

P_v ——硅元件平均正向功率损耗，瓦；

R_{ac} ——硅元件正向等效电阻，欧姆。

硅元件的功率损耗将产生热量，使元件的温度升高。而元件整流结的温度是有一定限度的，超过了限度，就会使元件发生热击穿而损坏，所以元件功率损耗的计算就具有重要的意义。现举例说明如下：

一个额定 200 安（指平均值）的元件，具有如图 1-8 的特性

曲线, 可得 $U_{th}=0.5$ 伏, $R_{ac}=\frac{\Delta U}{\Delta I}=\frac{0.3\text{伏}}{300\text{安}}=0.001$ 欧, 试求

在单相半波和六相星形二种整流电路中(电阻性负载)该元件在额定电流时的正向功率损耗。在单相半波整流电路中通过元件电流的平均值和均方根值的比例为 1 : 1.57。六相星形结线时通过元件电流的平均值和均方根值的比例为 1 : 2.44。

在单相半波整流结线时元件的正向功率损耗为:

$$\begin{aligned}P_v &= 0.5\text{伏} \times 200\text{安} + 0.001\text{欧} \times (200\text{安} \times 1.57)^2 \\&= 100\text{瓦} + 98.6\text{瓦} \\&= 198.6\text{瓦}\end{aligned}$$

在六相星形结线时元件的正向功率损耗为:

$$\begin{aligned}P_v &= 0.5\text{伏} \times 200\text{安} + 0.001\text{欧} \times (200\text{安} \times 2.44)^2 \\&= 100\text{瓦} + 238\text{瓦} \\&= 338\text{瓦}\end{aligned}$$

从以上例子可以看出, 同样通过 200 安的平均电流, 由于用在不同的整流电路上, 两者的功率损耗相差近一倍。

由此可见, 不能单纯根据平均值或均方根值来选择元件, 而应该根据功率损耗来选择元件, 因为功率损耗是产生热量使元件温度上升并是否超过极限的决定因素。

四、热 阻

标准规定硅整流结的极限工作温度为 200°C 和正常工作条件下的最高温度为 140°C 。硅元件在工作时, 整流结、基座和散热片等部位的温度是各不相同的, 这是由它们各自的热容量和散热能力不同决定的。如果按热学理论(根据各部位的热容量和散热能力的具体情况)来计算整流结的温升那是比较复杂的。同时, 要直接测得整流结的温度也是比较困难的。为了便于合理地设计和使用硅元件, 元件制造厂提供了元件的热特性参数——热阻,

利用热阻便可算出运行时整流结的实际温度。

热阻：元件在正常工作时，整流结与某指定部位（例如散热器）的温度差，与元件的平均功率损耗的比值，即为元件整流结对该部位的稳态热阻，单位是度°C/瓦。现举例说明如下：

一个 200 安的硅元件，室温是 40°C，按照规定的冷却条件，通以平均值为 200 安的单相工频正弦半波电流，负载是纯电阻，这样维持相当长时间直到整流结的温度稳定（也就是产生的热和散发的热趋于平衡）。如果此时测得整流结的温度平均值稳定在 140°C，或者说整流结对室温的温度差是 $140^{\circ} - 40^{\circ} = 100^{\circ}\text{C}$ 。可计算元件的平均功率损耗（假定元件的起始电压 $U_{th} = 0.5$ 伏， $R_{ac} = 0.004$ 欧）。

正向功率损耗

$$\begin{aligned} P_v &= U_{th} \cdot I_{av} + R_{ac} \cdot I_{R.M.S}^2 \\ &= 0.5 \text{ 伏} \times 200 \text{ 安} + 0.004 \text{ 欧} \times (1.57 \times 200 \text{ 安})^2 \\ &= 495 \text{ 瓦} \end{aligned}$$

假定元件的反向功率损耗为正向功率损耗的 5%，则元件在一周内平均功率损耗为：

$$P_a = P_v \times 1.05\% = 520 \text{ 瓦}$$

这样就能求得该元件在规定条件下整流结对周围空气介质（40°C）的稳态热阻 R_j ：

$$R_j = \frac{140^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}}{520 \text{ 瓦}} \approx 0.19^{\circ}\text{C/瓦}$$

上面所述的热阻是元件的稳态总热阻。

为了便于使用，硅元件通常有如下几种热阻：整流结对基座螺栓的热阻；整流结对散热器的热阻；基座螺栓对散热器的热阻；散热器对周围空气介质的热阻；整流结对周围空气介质的热阻。

对于短暂的冲击负载（0~2 秒左右），上述稳态热阻不能用来计算整流结上引起的即时温升，必须考虑到一个暂态热阻。因