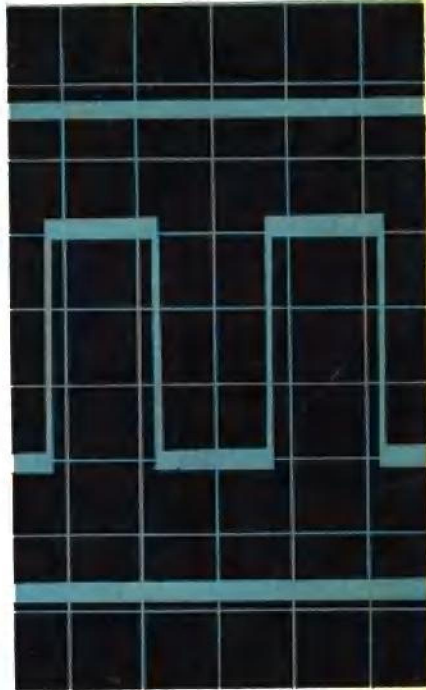
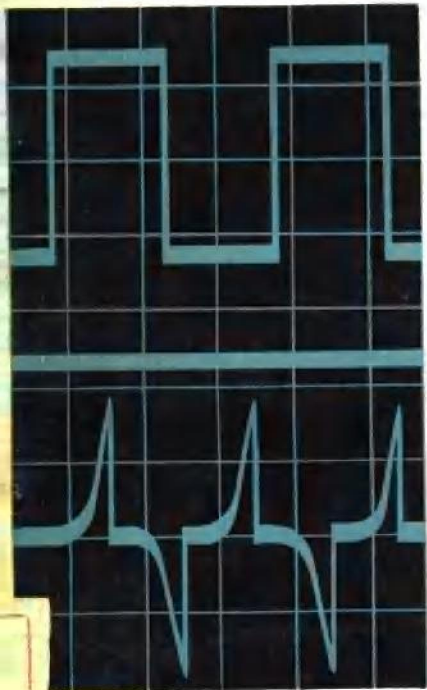


● 樊元武 编著

硅变交流器工程



中国建筑工业出版社

本书介绍硅变流器的整流理论，整流器的保护、设计与应用技术。主要内容包括：硅整流元件的构造、特性及技术参数；整流电路；硅整流器的全部外特性与故障电流计算方法；硅整流元件的并联与串联；整流器组的并联；硅整流器的保护；硅整流器的结构、安装与运行；硅变流器的应用（侧重于城市电力牵引）。

本书主要供交通、建筑、冶金、矿山、石油化工、电力、国防等部门从事电工的技术人员和科研人员参考，也可供大专院校师生参考。

硅变流器工程

樊元武 编著

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：10 字数：266千字
1983年12月第一版 1983年12月第一次印刷
印数：1—4,000册 定价：1.25元
统一书号：15040·4532

前 言

由于硅变流器具有效率高、体积小、重量轻、噪音小、无污染、运行维修简单等优点，因此它们在交通、建筑、冶金、矿山、国防、电力、煤炭、石油化工等部门的应用甚广。

为了适应“四化”建设的需要，给电工技术人员、科研人员和大专院校师生提供一些学习参考资料，以不断提高变流技术水平，作者把过去的资料整理、充实编著了这本书。

本书的特点：

（一）详细论述硅整流器全部外特性、故障电流计算方法、串并联技术、过电流保护和过电压保护等部分。

（二）硅整流器应用部分以电力牵引为主。

由于变流技术的理论较深，作者的能力有限，技术水平较低，并且是利用业余时间编写本书的，书中会有不少缺点，诚恳地希望同志们多提意见，以便再版时加以更正。

作 者

1982年9月

目 录

前 言

第一章 概述	1
第二章 硅整流元件的构造、特性及技术参数	5
第一节 硅整流元件的特性	5
第二节 硅整流元件的构造及技术数据	26
第三章 整流电路	44
第一节 整流电路电流与电压的计算原则	44
第二节 主变压器的接法和计算	54
第四章 硅整流器的全部外特性与故障电流的计算方法	118
第一节 整流电路全部外特性的确定方法	118
第二节 三相桥式整流电路的全部外特性	127
第三节 三相桥式整流电路内部短路电流的计算方法	150
第四节 双Y、中性点联有平衡电抗器的整流电路的内部 短路电流计算方法	159
第五节 三相桥式整流电路以及双Y、中性点联有平衡电抗 器的整流电路外部短路电流的计算方法	161
第五章 硅整流元件的并联与串联；整流器组的并联	167
第一节 硅整流元件的并联	167
第二节 硅整流元件的串联连接	180
第三节 硅整流元件的串-并联连接	189
第四节 可控硅整流元件串、并联工作时对触发的要求	191
第五节 硅整流器组的并联运行	192
第六节 硅整流器与水银整流器的并联运行	197
第六章 硅整流器的保护	199
第一节 过电流保护装置	200
第二节 过电压保护	220

第三节	硅整流器保护装置及信号设备的总体设计	235
第四节	硅整流器的工作可靠性	244
第五节	硅整流器的标准负载等级及直流电流额定值	247
第七章	硅整流器的结构、安装与运行	249
第一节	硅整流装置的结构及安装	249
第二节	硅整流器的运行	264
第八章	硅变流器的应用	271
第一节	牵引变电所的硅整流装置	271
第二节	硅升压器	302
主要参考文献	308

第一章 概 述

直流电源在国民经济上的地位非常重要，它可以应用于城市电力牵引、电力铁道、矿山运输、建筑业、电解工业、轧钢及炼钢工业、同步电机励磁、直流输电以及国防工业等各个方面。在工业发达的国家，总发电量中直流负荷所消耗的电能要占25~30%。我国工业和科学技术正处于赶超世界水平的阶段，直流电的重要性也日益显著。

但是由于传输及变压方便，发电厂所发的电能一般是交流电。为了将交流电变换为直流电，就必须采用一种特殊的机器—变流器。变流器分电动发电机、回转变流机、水银整流器、接触式变流机、硒整流器、锗整流器与硅整流器等数种。在水银整流器没有发明之前，大容量变流器多采用电动发电机及回转变流机。在水银整流器发明及制造成功后，水银整流器就代替了电动发电机及回转变流机，从三十年代开始到五十年代为止，一直为其黄金时代。接触式变流机在五十年代昙花一现，现在已不发展。从五十年代初期起，人类掌握了锗整流器及硅整流器的制造技术，锗整流器及硅整流器就渐露头角。由于硅整流器的优点多于锗整流器，因此人们就以硅整流器（非控式及可控式）作为发展重点，在变流技术上进行了一次大革命。目前大容量及高电压的硅整流器和可控式硅变流器均已制成，代替了其他的变流器。

现在我们对各种变流器来作一次比较（见表1-1）。

其次比较各种半导体整流器的特性，如表1-2所示。

从表1-1及表1-2中可以看出，硅整流器有下列优点：

（一）硅整流器压降小，效率高（98~99%），容许工作温度范围大（ -60°C ~ $+200^{\circ}\text{C}$ ），寿命长。

各种变流器的定性比较

表 1-1

项 目	回转变流机	水银整流器	接触式变流机	硅、锗整流器
构造基础	复杂	简单	复杂	极简单
必须	必须	不要	不要	不要
安装	麻烦	较简单(因有附属设备)	容易	简单
噪音	大	中等	中等	小
过载能力	大(一般为200%额定电流, 5分钟)	大(一般为200%额定电流, 1分钟)	小(超过临界负荷时即会发生火花)	小(硅整流元件一般为200%额定电流, 5秒钟)
消耗零件	金属电刷	无	接点	无
维护工作量	大	不大	大	小
价 格	中等	小	小	小
效率(%)	95左右	随电压变化大	99.5	98~99

各种半导体整流器的特性比较

表 1-2

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

(二) 体积小, 重量轻, 辅助设备少, 所以整流站的建筑大大简化, 投资少, 便于搞成自动化及运动化的中小型整流站。

(三) 噪音小, 无污染, 有利于运行维护人员健康。

(四) 运行维护简单, 硅元件损坏可现场更换, 维护费用低。

(五) 整流器一支路故障, 其熔断器熔断, 臂内另几个支路可继续运行, 维持供电。待负荷允许时检修更换。

由于硅整流器具有上述优点, 在新建及改建整流站时, 均采用硅整流器。

硅整流元件制造技术进步很快, 其世界水平如下:

从表1-3及表1-4中可以看出：国外硅整流元件的生产水平已达到5.6KV，1000A。

1977年国外大功率硅整流元件的参数指标 表 1-3

国 名	公 司	型 号	反向重复 峰值电 压 (伏)	正向平均 电 流 (安)	结 构
美 国	功率半导体公司	JD6000-6	600	4.75K	平板型
英 国	联合电气公司	S962SXU56	5.6K	335	平板型
英 国	联合电气公司	DS912SM56	5.6K	600	平板型

1981年国外大功率硅整流元件的参数指标 表 1-4

国 名	公 司	型 号	反向重复 峰值电压 (伏)	正向平均 电 流 (安)	结 构
美 国	功率半导体公司	JD6000-6	600	4.75K	平板型
英 国	联合电气公司	S962SXU56	5.6K	335	平板型
英 国	联合电气公司	DS912SM56	5.6K	600	平板型
英 国	联合电气公司	DS2012 SM56	5.6K	1000	平板型

硅整流器及可控式硅整流器目前的电流最高水平为30万安培以上，电压最高水平为100万伏以上，它们的发展非常迅速。

由于硅整流器及可控式硅整流器具有上述优点，同时它们的电流水平及电压水平不断提高，其应用范围包括下述六个方面：

- (一) 整流；
- (二) 逆变；
- (三) 变频；
- (四) 直流变换（包括直流斩波）；
- (五) 复合变换：包括作用复合（例如无整流子式电动机）及装置复合（例如直流输电）两种。

(六) 开关：包括自然换相式(例如升压器及电压调整器)、强迫换相式(例如高速断路器)及相位控制式(例如电热、照明控制)三种。

变流器的发展方向为超导体整流器，其效率接近100%。

第二章 硅整流元件的构造、 特性及技术参数

第一节 硅整流元件的特性

一、伏安特性

硅整流元件的伏安特性是元件的主要特性之一。硅整流元件的额定数据、负载能力以及串、并联的可能性（分级分组）均取决于其伏安特性。

知道硅整流元件的伏安特性后，就可以确定硅整流装置的主要特性、计算整流电路的技术数据以及正确地选择保护方式。

根据理论分析，硅整流元件的伏安特性可用下式表示：

$$I = I_{\text{is}} \left(e^{\frac{qU}{kT_0}} - 1 \right) \quad (2-1)$$

式中 I_{is} ——饱和电流（安）；
 q ——电子的电荷（库伦）， $q=1.6 \times 10^{-19}$ 库伦；
 U ——加于p-n结的电压（伏）；
 T_0 ——绝对温度（°K）；
 k ——布尔兹曼常数， $k=8.62 \times 10^{-5}$ 电子伏/K；
 e ——自然对数底。

但是，根据（2-1）式所绘制的伏安特性曲线仅在电流及电压较小的情况下才与实验所得的伏安特性曲线相符合。当电流及电压值接近于额定值时，根据（2-1）式所绘制的伏安特性曲线的误差很大。当p-n结的面积增加时，此种误差也会增大。为什么会发生此种误差呢？这是由于在理论分析时忽视了一系列的因素，其中包括：p-n结的不均匀性（会引起载流子分布的不均匀

性)。p-n结表面与保护绝缘层中的现象等等。

现在我们来介绍实际测得的正、反向伏安特性曲线。

半导体整流元件的伏安特性可分三类：

(一) 静态伏安特性：在硅整流元件上施加直流电压时所测得的电流-电压关系，称为静态伏安特性。在这种情况下，正、反向伏安特性是分别测得的。

(二) 动态伏安特性：在硅整流元件上施加50周波的正弦形交流电压时所测得的瞬时电流-瞬时电压关系，称为动态伏安特性。在这种情况下，正、反向伏安特性可在一次试验中同时测得。

(三) 分类分级用伏安特性：硅整流元件的平均电流值与其正向电压平均值或其反向电压峰值(最大值)之间的关系，称为分类分级用伏安特性。

图2-1所示为锗整流元件与硅整流元件的静态伏安特性曲线。在第一象限内所示的为正向伏安特性曲线，从图中可以看出，在电流值相同的情况下，锗整流元件的正向电压降较硅整流元件为小。

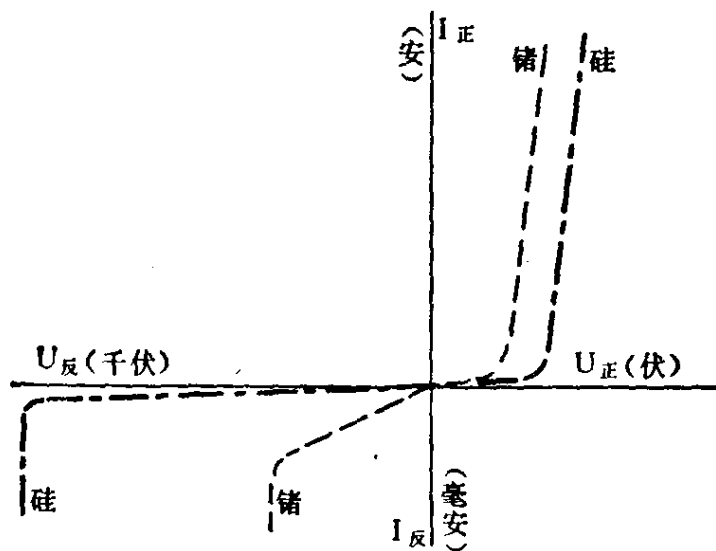


图 2-1 锗整流元件与硅整流元件的静态伏安特性曲线

半导体整流元件的正向伏安特性曲线如以图 2-2 上的理想特性曲线来代替时，则可用下列方程式来表示：

$$U_{\text{正}} = U_{\text{S}} + I_{\text{正}} R_{\text{正}} \quad (2-2)$$

式中 $U_{\text{正}}$ ——加于半导体整流元件的正向电压；

$I_{\text{正}}$ ——通过半导体整流元件的正向电流；

U_{S} ——门槛电压（起始电压）；

$R_{\text{正}}$ ——正向斜率电阻（ $\frac{1}{R_{\text{正}}}$ = 理想特性曲线直线部分的斜

$$\text{率 } \frac{dI_{\text{正}}}{dU_{\text{正}}} = \frac{\Delta I_{\text{正}}}{\Delta U_{\text{正}}}$$

正向伏安特性用来确定半导体整流元件的额定电流值。半导体整流元件的正向容许电流值受到下列因素的限制：（一）p-n 结的温度容许值；（二）正向电压容许值（从整流元件效率好坏的角度出发）。

图 2-1 第三象限中所示的曲线是半导体整流元件的反向伏安特性曲线。从图中可以看出，反向伏安特性曲线的特点是：反向电压虽高，但反向电流仍是很小的（毫安级）。比较锗整流元件与硅整流元件的反向伏安特性曲线可知，锗整流元件的反向电流较硅整流元件的反向电流大得多

（约大一个数量级）。这是由于这两种元件中晶格的结合能力不同的缘故。

单独的反向伏安特性曲线示于图 2-3 上。在此图上，A 区段代表反向电压大于 0.25 伏时的反向伏安特性曲线。在理想整流元件的情况下，即使反向电压值增大到几百伏，A 区段内的反向电流值将保持恒定不变。此项反向电流值称为饱和电流。在实际整流元件的情况下，当反向电压值增大到某一数值时，反向电流将开始缓慢地增长（B 区段），然后越来越快地增长。如果不采取

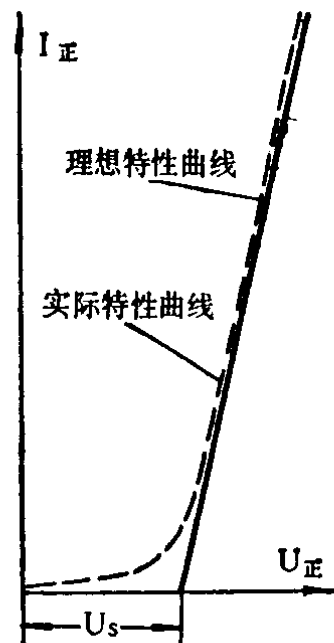


图 2-2 正向伏安特性曲线

特别措施的话，则 p-n 结将被击穿（C 区段）。最后，在 D 区段，反向电流值将迅速地增长到很大的数值，反向伏安特性曲线

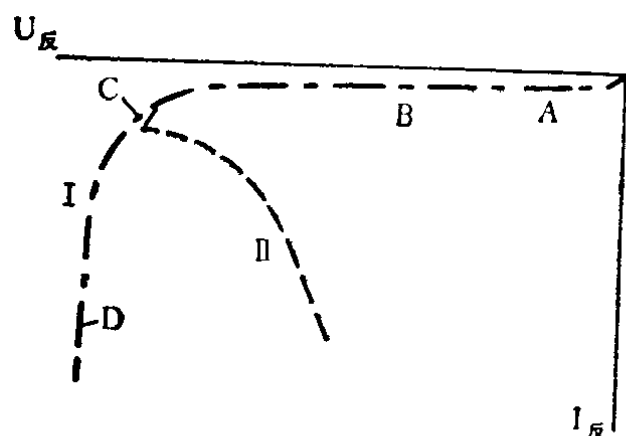


图 2-3 半导体整流元件的反向伏安特性曲线

将具有曲线 I 或曲线 II 的形状。

p-n 结具有下列四种不同的击穿形式：

- (一) 齐纳击穿；
- (二) 雪崩击穿或撞击电离击穿；
- (三) 热击穿；
- (四) 表面击穿。

齐纳击穿是由半导体晶格中强大电场直接造成的结果。在强大电场力的作用下，价电子可以离开共价键。在这种情况下，就会形成电子-空穴对，使通过 p-n 结的电流增大，从而引起击穿。

在许多情况下，当电场强度较弱时，也会出现击穿现象，这是由于雪崩击穿所造成的。

当硅整流元件发生齐纳击穿及雪崩击穿时，其 p-n 结的电阻值迅速下降，因此其电流值剧烈上升。

当 p-n 结中的电场强度不高，但通过 p-n 结的电流较大时，如果 p-n 结的散热不好，则可能发生热击穿。这是由于：当散热不好时，p-n 结的温度升高，载流子浓度增大，其电流增大。当电流增大时，p-n 结中的功率损失增大，使其温度更加升高，如此继续不断地进行下去，造成恶性循环，使 p-n 结发生热击穿。

上述三种击穿形式的伏安特性非常相似，因此当 p-n 结被击穿时，很难判断是何种原因引起的。上述三种击穿形式均能引起 p-n 结或硅整流元件完全损坏。

表面击穿往往在 p-n 结裸露于硅片表面的部分发生，其原因为：（一）该部分易受外界损伤、沾污与影响，因此容易击穿；（二）该部分会出现表面电场强度集中的现象，当硅整流元件加有反向电压时，硅片的表面漏电流常常超过体反向电流，同时

还有可能在表面的薄弱处出现密度很大的局部电流，形成毁灭性的表面热击穿。没有经过表面处理的硅整流元件，往往在p-n结尚未达到雪崩击穿时，表面就已击穿，而且是毁灭性的击穿，这就大大降低了硅整流元件的击穿电压并缩短了它们的寿命。

克服表面击穿的方法是表面磨角，以降低表面电场强度，提高表面击穿电压。为进一步稳定表面，对磨角后的表面进行充分的磨蚀清洗，并用良好的绝缘物如101硅橡胶、705硅橡胶、1053硅漆等保护表面。也可以在结表面上覆盖一层二氧化硅，以实现表面的保护。

还有一种故障是螺栓型硅整流元件管壳外表面击穿现象。这种击穿现象的原因是：当硅整流元件的反向重复峰值电压（定义见后）提高后，其阳极与阴极之间的爬电距离未相应增加，因此在发生过电压时，阴、阳极之间会发生放电烧灼现象。

防止此种故障的方法是：

（一）改革制造工艺，增加硅整流元件阴、阳极间的爬电距离（或改为陶瓷密封式）；

（二）对硅整流器加强保养，除去硅整流元件上的尘垢；

（三）在硅整流元件的管壳上套以塑料管，管底以环氧树脂密封，增加爬电距离。

以交流电源测得的反向伏安特性可用来确定反向重复峰值电压。在这种情况下，以半波正弦电压作电源，调节输入电压，借示波器观察硅整流元件的接近击穿电压点（反向伏安特性曲线弯曲处），然后取其值的80%作为反向重复峰值电压。

虽然反向伏安特性曲线弯曲处邻近击穿区段，但用目测方法所确定的击穿电压值是十分近似的，在许多情况下，尤其当硅整流元件具有“软”的反向伏安特性曲线时，用目测方法所得的结果可能是不正确的。

硅整流元件的击穿电压值可用条件 $dU/dI=0$ 来确定。

然而，当采用实验方法来确定击穿电压值时，为了防止p-n结损坏起见，不得不采用其它方法：预先规定硅整流元件的最大

容许功率值 $P_{\text{最大}} (=U_{\text{最大}} I_{\text{最大}})$ 或最大容许反向电流值 $I_{\text{反(最大)}}$ ，然后根据这些规定值及反向特性曲线来确定击穿电压值。

由于硅整流元件 p-n 结的温度变化对其伏安特性的影响很大，因此我们对此影响必须进行详细的研讨。

硅整流元件的伏安特性曲线可以看作是由饱和区段、正向电压击穿区段及反向电压击穿区段三个区段组成。在饱和区段内，通过硅整流元件的电流是很小的，并且在宽广的范围内，电流值几乎与所加电压值无关。在正向电压及反向电压击穿区段内，当正向电压或反向电压升高时，通过硅整流元件的电流将剧烈地增长。三个区段的伏安特性都随温度的变化而变化：饱和电流随温度的上升而增大，正向电压降则随温度的上升而减小。这是因为：门槛电压的温度系数具有负值，而相反地，晶体电阻的温度系数具有正值。

当电流值固定不变时，在温度上升的情况下，硅整流元件的正向电压降及功率损失将会减小。因此，在这种情况下，正向伏安特性将会改善少许。

在反向伏安特性曲线的饱和区段内，当温度上升时，反向电流将剧烈地增长。这是由于体积电荷区内载流子产生率增长的缘故。虽然当温度上升时，反向电流会剧烈增长，但是硅整流元件的结温高达 140°C 时，其工作仍是稳定的。

在反向电压击穿区段内，击穿电压值可能随温度的上升而增大，也可能随温升的上升而减小，这需要视击穿的形式而定。

例如，击穿电压值低于 6 伏的低压硅整流元件的击穿形式为齐纳击穿，其击穿电压的温度系数具有负值，并接近于零。击穿电压值为 7~40 伏的硅整流元件的击穿形式，起先是齐纳击穿，然后是雪崩击穿。击穿电压值为 40~1200 伏的高压硅整流元件的击穿形式一般是雪崩击穿，击穿电压的温度系数具有正值。合金型硅整流元件击穿电压的温度系数等于 $10 \cdot 10^{-4} \sim 26 \cdot 10^{-4} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；扩散型硅整流元件击穿电压的温度系数较合金型硅整流元件的略小，约为后者的三分之二。

我国ZP200型硅整流元件的动态伏安特性曲线如图2-4所示。

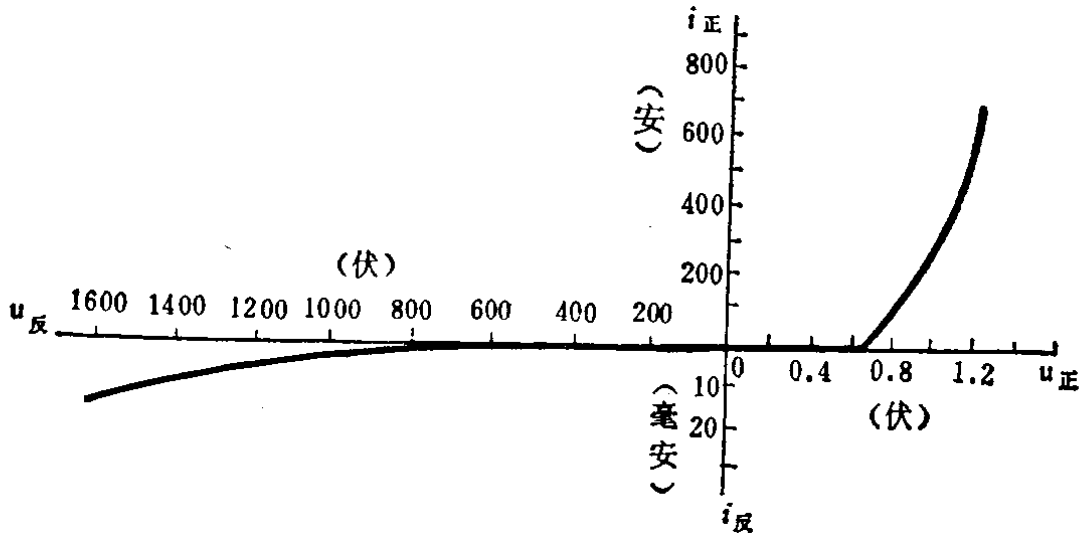


图 2-4 ZP200型硅整流元件的伏安特性曲线

二、硅整流元件的等效电路图

当确定硅整流元件的功率损失或者研究它在整流电路中的工作状况时，可用等效电路来代替它。

硅整流元件正向导电时的等效电路如图2-5(a)所示，此等效电路是根据图2-2上所示的理想伏安特性曲线得到的。图中，门槛电压 U_s 的极性必须与正向电流的方向相反。

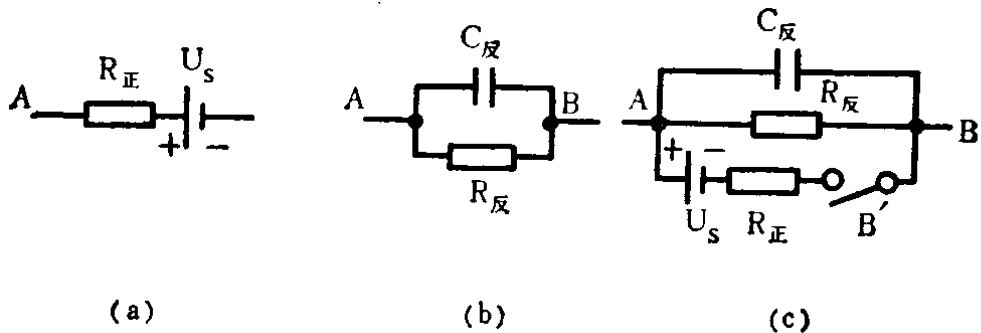


图 2-5 硅整流元件的等效电路图

(a)正向等效电路图；(b)反向等效电路图；(c)综合等效电路图

$R_{正}$ ——正向斜率电阻； U_s ——门槛电压； $C_{反}$ ——反向电容； $R_{反}$ ——反向电阻。

硅整流元件的反向等效电路示于图2-5(b)上。

综合正、反向特性的等效电路图示于图2-5(c)上。图中，开关 B' 代表理想整流元件。 B' 的开闭决定于AB两端之间的电压

大小。当 $U_{AB} > U_s$ 时，开关 B' 就闭合，而让正向电流通过它。当电路中的电压变为负值时，开关 B' 不在 $U_{AB} = U_s$ 的瞬间开断，而在稍微延迟一些时间后开断。因此在一定的时间间隔内（在积聚载流子消散之前），硅整流元件（开关 B' ）中将通过很大的电流，其数值决定于正向电流、反向电压与电路总阻抗。此项时间延迟代表硅整流元件延迟恢复其阻断性能的一段时间间隔，它是硅整流元件的一个重要参数。在此段时间间隔内所流过的电流脉冲会引起过电压，关于这点，我们将在后面论述。

三、硅整流元件的功率损失

硅整流元件中的功率损失系转变为热能的形式。硅整流元件单位时间内所产生的热量系与功率损失成正比。当硅整流元件产生热能的同时，热能会逸散到周围介质中去。单位时间内所散出的热量随 p - n 结与周围介质之间的温差而变化。如果所散出的热量少于所产生的热量，则 p - n 结的温度将继续上升，直到单位时间内所产生的热量与所散出的热量平衡为止。

硅整流元件中的功率损失 P_{Σ} 等于正向功率损失 $P_{\text{正}}$ 与反向功率损失 $P_{\text{反}}$ 之和。在一般情况下， P_{Σ} 可用下式来求出：

$$P_{\Sigma} = P_{\text{正}} + P_{\text{反}} = \frac{1}{T} \left[\int_{t_0}^{t_1} u_{\text{正}}(t) i_{\text{正}}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} u_{\text{反}}(t) i_{\text{反}}(t) dt \right]; \quad (2-3)$$

式中 P_{Σ} ——硅整流元件的功率损失；

T ——周期；

$t_1 - t_0$ ——导通时间；

$t_2 - t_1$ ——阻断时间；

$u_{\text{正}}(t)$ ——正向电压降瞬时值；

$u_{\text{反}}(t)$ ——反向电压瞬时值；

$i_{\text{正}}(t)$ ——正向电流瞬时值；