

# 可关断可控硅试制小结

---

活 页 技 术 资 料

编 号 022

机 械 工 业 出 版 社

# 可关断可控硅试制小结

(只限国内发行)

\*

机械工业出版社出版 (北京阜外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

1971年5月北京第一版·1971年5月北京第一次印刷

\*

统一书号: 15033·(内)417·定价0.20元

# 目 录

## 一 原理与结构

|                      |      |
|----------------------|------|
| 1. 可关断可控硅开通机构.....   | (3)  |
| 2. 关断机构.....         | (7)  |
| 3. 主要参数及控制极伏安特性..... | (11) |
| 4. 结构.....           | (12) |

## 二 工艺

|              |      |
|--------------|------|
| 1. 工艺流程..... | (14) |
| 2. 扩散.....   | (18) |
| 3. 光刻.....   | (35) |
| 4. 真空蒸铝..... | (43) |
| 5. 烧结.....   | (45) |

## 三 特性分析

|                   |      |
|-------------------|------|
| 1. 正向耐压.....      | (49) |
| 2. 反向耐压.....      | (51) |
| 3. 高温特性.....      | (52) |
| 4. 正向压降.....      | (54) |
| 5. 影响关断能力的因素..... | (55) |

## 四 测量

|                 |      |
|-----------------|------|
| 1. 耐压测试.....    | (60) |
| 2. 低频测试.....    | (61) |
| 3. 动态测试.....    | (66) |
| 4. 维持电流的测量..... | (70) |

# 可关断可控硅试制小结

上海工学院

我院在工人阶级的领导下，高举党的“九大”团结、胜利的旗帜，遵循毛主席光辉的教育革命思想，进行了教育革命实践。

毛主席教导我们：“**改革旧的教育制度，改革旧的教学方针和方法，是这场无产阶级文化大革命的一个极其重要的任务。**”

**“抓革命，促生产。”**这是我们建立可控硅组的指导思想。在工宣队老师傅的带领下，以大批判开路，批判了贪大求洋、“爬行主义”、

**“洋奴哲学”，**狠批了理论至上、业务第一、名利思想，批判了把生产与教学割裂开来的错误思想。我们坚决贯彻执行毛主席的**“自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想”**的伟大教导，坚持突出无产阶级政治，满怀为毛主席争光，为社会主义祖国争光的革命豪情，为了赶超世界先进水平，为了打击帝、修、反，在试制可关断可控硅的任务中，以毛主席的光辉著作《实践论》、《矛盾论》，来指导科学实践。我们还组织了部分教师走出校门，到汽车电机厂、上无十四厂跟工人老师傅相结合，接受工人阶级再教育的同时在西整所等兄弟单位支持、帮助下，经过几个月的艰苦奋战，现已初步试制成正向耐压500伏，阳极电压60伏时关断7~8安培，100伏时关断4安培，400伏时关断2安培，开通和关断时间在20微秒左右的管子。

我们取得的成绩只是初步的，离无产阶级司令部对我们的要求还相差很远。我们一定要下定决心，不怕牺牲，排除万难，去争取更大的胜利。并以清华经验为榜样，为创办社会主义理工科

大学而奋斗！

遵循伟大领袖毛主席“要认真总结经验”的教导，我们写了这份小结，在小结中对很多问题认识尚不成熟，甚至错误不少，请同志们批评指正。

## 一 原理与结构

控制极可关断硅可控整流器（以下简称可关断可控硅）又称门控开关，是一种特殊可控硅整流元件，它与一般的可控硅整流器（以下简称可控硅）一样，是个四层三端式半导体元件。

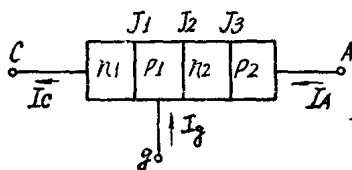


图 1

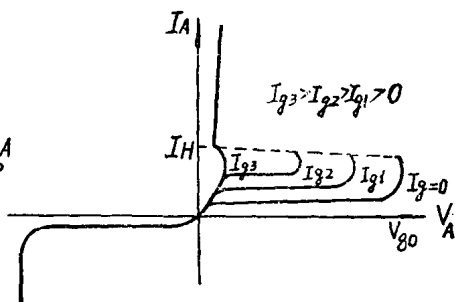


图 2

可关断可控硅的阳极伏-安特性曲线的基本特征与可控硅相同，如图 1、2 所示。在控制极正脉冲触发下，二者都能由阻断（高阻）状态，转变为导通（低阻）状态。但是对于可控硅来说，一旦元件处于导通状态，控制极便失去了对阳极电流的控制作用，若要使元件由导通状态转变到阻断状态，只有把阳极电流减小到维持电流  $I_H$  以下才能实现，这是可控硅的一个缺点，使它在应用上有一定的局限性。然而可关断可控硅则克服了这一缺点，它能够用控制极负脉冲来使元件由导通状态过渡到阻断状态，因而在

直流回路和高频变频回路上可关断可控硅显示出它的优越性。

毛主席教导我们：“我们的实践证明：感觉到了的东西，我们不能立刻理解它，只有理解了的东西才更深刻地感觉它。感觉只解决现象问题，理论才解决本质问题。”为了更深刻地理解可关断可控硅的特性，并指导我们去创造性能更为理想的元件，在介绍可关断可控硅制造工艺之前，我们先介绍一下它的基本作用原理。

### 1. 可关断可控硅开通机构

虽然可关断可控硅开通机构与一般可控硅完全相同，但是对于开通机构的深入了解，有助于对关断机构的理解，所以我们还是首先从开通机构开始介绍。

先从最简单的  $N-P-N-P$  二端元件开始。

当阳极  $A$  加一正电压  $U_{AC}$  时，如图 3，显然  $J_1$ 、 $J_3$  结处于正

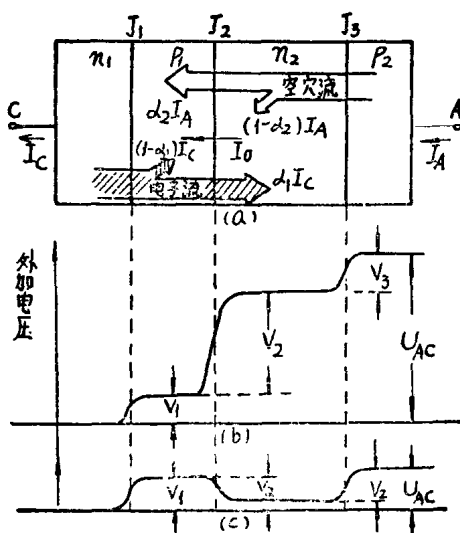


图 3

偏状态，而  $J_2$  结处于反偏状态。因而，整个元件由于  $J_2$  结的反偏而处于高阻状态，即阻断状态。如图 4 曲线  $OA$  部分。通过元件的电流，主要由  $J_2$  结的反向漏电流  $I_0$  所决定。

设  $J_1$  结的电子注入比为  $\gamma_1$ ， $P_1$  基区的传输系数为  $\beta_1$ ，不难看出，流过  $J_2$  结的电子流为

$$I_{2n} = I_c \gamma_1 \beta_1 + I_{on} = I_c \alpha_1 + I_{on} \quad (1)$$

其中  $\alpha_1 = \gamma_1 \beta_1$ ，相当于以  $N_1$  为发射极的  $N_1-P_1-N_2$  三极管电流放大系数。 $I_{on}$  为  $J_2$  结反向饱和电流的电子流部分。

同样，设  $J_3$  结的空穴注入比为  $\gamma_2$ ， $n_2$  基区的传输系数为  $\beta_2$ ，则流过  $J_2$  结的空穴流为

$$I_{2p} = I_A \gamma_2 \beta_2 + I_{op} = I_A \alpha_2 + I_{op} \quad (2)$$

所以，流过  $J_2$  结的总电流

$$I_2 = I_{2p} + I_{2n} = I_c \alpha_1 + I_A \alpha_2 + I_{on} + I_{op} \quad (3)$$

注意到  $I_{on} + I_{op} = I_0$

又根据电流连续性原理，应有

$$I_2 = I_c = I_A$$

所以 (3) 式改为：

$$I_A = I_A (\alpha_1 + \alpha_2) + I_0,$$

即：

$$I_A = \frac{I_0}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad (\alpha_1 + \alpha_2 < 1) \quad (4)$$

考虑到势垒区的碰撞电离效应则 (4) 式应改写为

$$I_A = \frac{I_0 M}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2) M} \quad (5)$$

式中  $M$  为电流倍加因子。

在阳极电压不很高时，碰撞电离很弱， $M \simeq 1$ ，又因在小电流情况下  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  均很小，因此由 (5) 式可见  $I_A$  的大小与  $J_2$  结反向饱和电流相差无几，随着阳极电压提高，加在  $J_2$  结上的反向

偏压  $V_2$  也不断提高。当  $V_2$  接近  $J_2$  结的雪崩击穿电压时, 碰撞电离加剧,  $M$  迅速增大, 因而电流也随之增大。

$$M = \frac{1}{1 - \left( \frac{V_2}{V_B} \right)^n} \quad (\text{式中 } n \text{ 对硅来讲数值在 } 2 \sim 4 \text{ 之间})$$

同时, 由于  $\alpha_1, \alpha_2$  将随电流增大而增大, 因此, (5) 式分母中乘积  $M(\alpha_1 + \alpha_2)$  增大, 当  $V_{Ac} = V_{B0}$  时, 使  $M(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$ , 此时 (5) 式成为一不定式元件处于一个临界状态。电压保持不变而电流能继续上升 (见图 4 曲线  $AB$  部分),  $V_{B0}$  称可控硅的正向转折电压。随着电流的增大, 致使  $M(\alpha_1 + \alpha_2) > 1$ , 则元件进入一个不稳定的负阻状态 (图 4 的  $BC$  部分), 电压迅速下降, 直至进入一个新的稳定状态, 即低阻状态, 也就是导通状态。于是元件就导通了。

这里必须着重解释的是, 为什么对于单独一个  $P-N$  结而言, 当电压到达反向击穿电压时, 电流迅速上升, 电压并不下降, 而对于  $N-P-N-P$  四层元件, 当雪崩倍增现象发生后, 元件端电压却会迅速下降, 我们来分析一下, 进入  $P_1$  基区的载流子情况。由图 3 (a) 可见, 单位时间中进入  $P_1$  区的空穴数为  $I_A \alpha_2$ ,

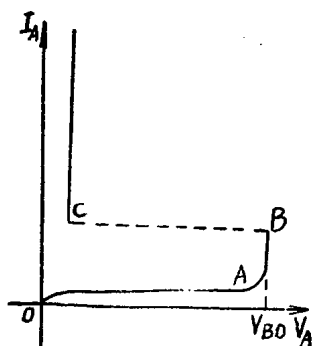


图 4

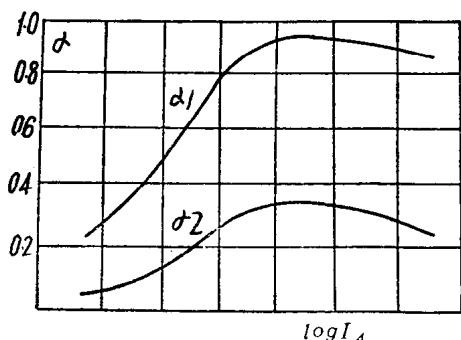


图 5

单位时间中进入  $P_1$  区的电子数为  $I_c (1 - \alpha_1)$ 。由于空穴带正电而电子带负电，因而单位时间中进入  $P_1$  区的净电荷为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = I_A M \alpha_2 - I_c (1 - \alpha_1 M) = I_A [M(\alpha_1 + \alpha_2) - 1] \quad (6)$$

在导通过程中，由于  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  随电流的增大而增大，如图 5，因而使

$$M(\alpha_1 + \alpha_2) > 1 \quad (7)$$

于是由 (6) 可见

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} > 0$$

即  $P_1$  区有正电荷积累，造成  $P_1$  区电位升高。同理  $N_2$  区有负电荷积累，直到  $J_2$  结处于正偏状态。此时，元件中的电位分布如图 3 (c) 所示。 $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$  结都处于正偏压状态，整个元件过渡到低阻态，正向压降很小，元件开通。

$J_2$  结电压由反偏过渡到正偏，电流倍增因子  $M$  也随之减小而趋于 1。因此， $P_1$  区的空穴积累条件 (7) 一般写为

$$\alpha_1 + \alpha_2 > 1 \quad (8)$$

在上面的分析中我们必须注意到， $J_2$  结发生雪崩倍增现象，它仅是提供了使元件能暂时通过大电流的条件，而由于  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  都随着电流的增大而上升，因此当  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  随着电流增大而变大以致积累条件 (8) 被满足时，使  $J_2$  结发生由负偏到正偏的反转，这是开通的关键所在。因此，只要我们能用适当的方法让  $I_A$  增大，使 (8) 式满足，于是就能把元件开通，控制极加正脉冲便是一种最好的方法。

现在考虑三端情况，设控制极加一正向电流  $I_g$ ，在稳定状态下，根据电流连续性方程有

$$I_c = I_A + I_g \quad (9)$$

代入 (3) 式，便有

$$I_2 = (I_A + I_g) \alpha_1 + I_A \alpha_2 + I_o$$

注意到  $I_2 = I_A$ , 故上式改为

$$I_A = \frac{I_0 + \alpha_1 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (10)$$

由 (10) 式不难看出, 控制极加一正向电流  $I_g$ , 使阳极电流将有相应的增加。当足够大的  $I_g$  能使  $I_A$  大到使条件 (8) 满足, 元件就被开通了。并且, 一旦元件开通, 即使  $I_g$  移去, 由于  $J_2$  结已处于正偏, 元件将维持导通状态。

## 2. 关断机构

现在我们进一步来分析元件由导通状态转变为阻断状态的这一过程的物理机构。

从前面开通过程的分析可以看出, 要把处于导通状态的可控硅元件关断, 必须设法使  $J_2$  结由正偏状态转变到反偏状态, 也就是要把开通过程中, 在  $P_1$  基区中积累的空穴排除出去, 显然, 若将阳极电流减小到维持电流以下, 即  $I_A < I_H$ , 以致使  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  减小, 满足  $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ , 则由 (6) 式可见, 此时,  $P_1$  区中有负电荷积累, 从而降低了  $P_1$  区的电位而使  $J_2$  结处于反偏状态, 元件转向阻断状态, 即关断。

显然, 用减小阳极电流把元件关断不是理想的办法, 我们下面来分析一下, 是否可能用控制极负脉冲来把元件关断。

当控制极通一负电流  $I_g$  时, 电流从  $P_1$  区流出, 也就是将一部分空穴从  $P_1$  区引出, 显然这是有利于关断的。要问需要加多大的  $I_g$ , 我们还是来分析  $P_1$  区的电荷积累情况, 单位时间流入  $P_1$  区的空穴为  $\alpha_2 I_A - I_g$ , 流入  $P_1$  区的电子数为  $I_c (1 - \alpha_1)$ , 欲使  $P_1$  区电位下降, 应有

$$\alpha_2 I_A - I_g < I_c (1 - \alpha_1) \quad (11)$$

而根据电流连续性方程, 应有

$$I_c = I_A - I_g \quad (12)$$

将 (12) 式代入 (11), 则

$$\alpha_2 I_A - I_g < (I_A - I_g) (1 - \alpha_1)$$

即

$$I_A (\alpha_1 + \alpha_2 - 1) < I_g \alpha_1$$

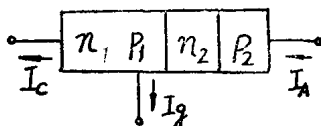


图 6

由此可见当

$$I_g > \frac{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}{\alpha_1} I_A \quad (13)$$

便能使  $P_1$  区空穴数下降, 即正电位下降。随着  $P_1$  区电位下降, 元件阻抗增大, 使  $I_A$  进一步下降, 直至  $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ , 元件过渡到阻断状态,  $J_2$  结处于反偏, 即使控制极断开, 元件将继续处于阻断状态。

由 (13) 式可见, 对于一定的阳极电流  $I_A$ ,  $\alpha_1 + \alpha_2$  越小 (越接近于 1) 而  $\alpha_1$  又越大, 则关断  $I_A$  所需的控制极电流  $I_g$  便越小。阳极电流  $I_A$  与关断该阳极电流所需的控制极电流  $I_g$  之比称可关断可控硅的关断增益  $B_{off}$ , 由 (13) 式不难得到:

$$B_{off} = \frac{I_A}{I_g} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1} \quad (14)$$

为了提高关断增益, 应当把  $\alpha_1$  做得大些, 同时  $\alpha_2$  做得小些, 使  $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$  而又尽可能接近于 1。

根据上面的分析, 看来似乎  $N-P-N-P$  四层三端元件, 都能用控制极负脉冲来关断。但实际上可控硅却没有这一特性, 原因是什么呢? 毛主席教导我们: “世界上的事情是复杂的, 是由各方面的因素决定的。看问题要从各方面去看, 不能只从单方面

看。”要明了可控硅不能用控制极负脉冲关断的原因，我们需要进一步分析在可控硅开通关断过程中，电流在元件横截面上的分布情况，也就是要考虑所谓横向效应。

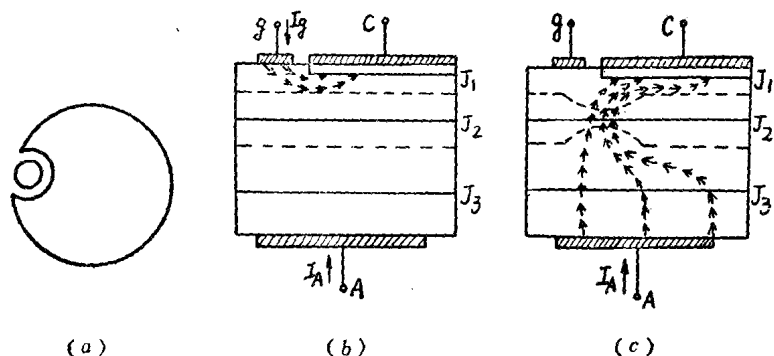


图 7

通常可控硅的阴极与控制极采用如图 7 (a) 所示的形状。

在开通前， $J_2$  结处于反偏，图 7 (b) 中虚线表示  $J_2$  结的空间电荷层，当控制极  $g$  加一正脉冲，有  $I_g$  从控制极流向阴极。由于  $I_g$  的横向分量，因而  $P_1$  区形成一个由左至右的横向压降，而  $n_1$  区是杂质浓度很高的低阻区，可视为等位。所以， $J_1$  的正偏压不是均匀一致的，左边较高，右边较低。因而在  $I_g$  开始通入时， $J_1$  结的靠近控制极的那部分电子注入首先增加，从而使  $J_2$  结中正对控制极下面的部分首先开通。这样阳极电流  $I_a$  最初的分布如图 7 (c) 所示。阳极电流在  $P_1$  区的横向分量，同样引起一个与  $I_g$  方向相同的横向压降，使  $J_2$  结的开通区不断扩展，最后整个  $J_2$  结由反偏过渡为正偏，可控硅开通。

现在考虑在导通状态下，控制极加负电流的情况。

当控制极加负压引起电流  $I_g$  时，电流分布如图 8 所示。此时，

$I_g$  的横向分量, 引起由右至左的电压降。可见, 靠近控制极处,  $J_1$  结将处于反偏而阻止了电子的注入, 因而靠近控制极部分被阻断, 但远离控制极部分将继续处于导通状态, 而阳极电流的横向分量无助于阻断区的扩展。一旦  $I_g$  移去,  $I_A$  的横向分量反而将使导通区扩展直至整个元件回到导通状态。若我们加上很大的  $I_g$  要强行关断, 则往往由于导通区被驱缩到很小范围, 造成局部点过热而损坏了  $P-N$  结。由此可见, 要使  $N-P-N-P$  四层三端式元件能用控制极关断, 必须尽量减小横向效应的影响。

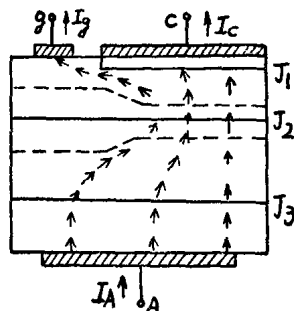


图 8

在可控硅基础上发展起来的可关断可控硅, 作了如下的改进。一方面, 改变元件内部参数, 使  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  的数值兼顾到既能开通, 又能关断 (即在额定阳极电流下,  $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$ , 但又使  $\alpha_1$  尽量大,  $\alpha_2$  尽可能地小, 同时  $\alpha_1 + \alpha_2$  不要比 1 大太多)。另一方面, 尽可能设法减小横向效应。也就是应当减小  $P_1$  区的横向电阻, 即控制极电阻。措施之一是增大  $P_1$  区的厚度及提高其杂质浓度, 但这样做将使  $\alpha_1$  减小, 不利于关断增益的提高。因此,  $P_1$  区厚度与杂质浓度的选择必须兼顾提高  $\alpha_1$  与降低横向电阻, 作折衷考虑。另一个措施就是改变电极形状, 采用同心圆环的形状, 且将阴极夹在控制极当中。并且尽可能缩小阴极环的宽度和缩短控制极与阴极间的距离, 以减小控制极电阻。作了这样改进后的四层三端元件, 就能用控制极负脉冲将它关断, 即成了一个可关断可控硅。横向效应的减小, 亦将大大缩短了开通时间  $t_{on}$  与关断时间  $t_{off}$ , 其结构如简图 9。

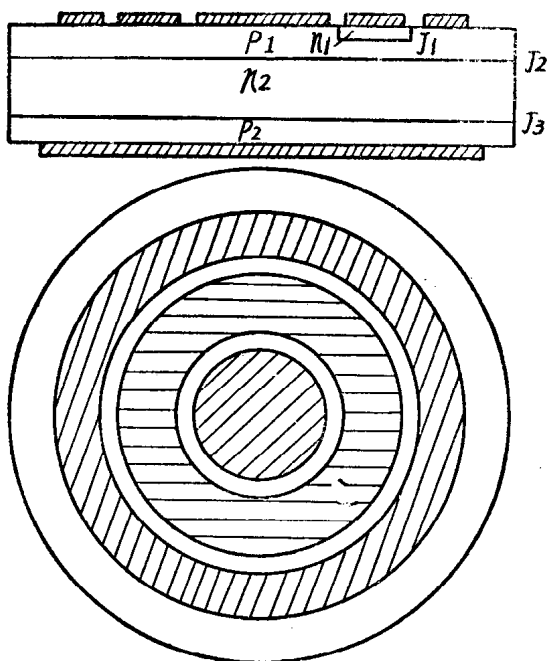


图 9

### 3. 主要参数及控制极伏安特性

控制极静态伏安特性曲线，是描写可关断可控硅开关作用的最好方法。可关断可控硅的控制极伏安特性典型曲线如图10所示。

当控制极加正电压， $I_g$  与  $V_g$  的关系与通常正偏  $P-N$  结的特性一样，电流随电压  $V_g$  的上升而增大。当  $I_g = i_{gr}$  时，开通条件  $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$  被满足，可关断可控硅开通，由于此时有阳极电流  $I_A$  流过，因而， $V_g$  有一个跃增。

在可关断可控硅导通的情况下， $I_g$  随着控制极电压的下降而减小。但由于阳极电流  $I_A$  的存在因而曲线将不通过原点而是连

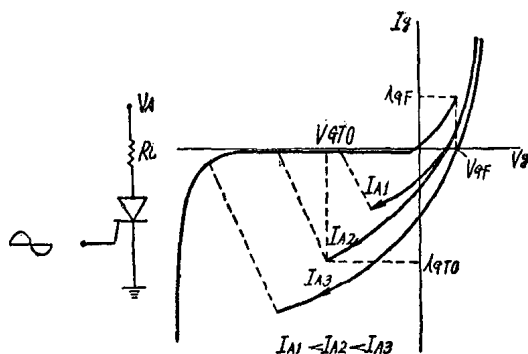


图 10

续地由第一象限通过第四象限，而进入第三象限。当电流  $I_g = i_{gro}$  时，可关断可控硅关断，控制极电流、电压又出现一个突变，电流减小（指绝对值）。电压增大（亦指绝对值），伏安特性曲线与正常  $P-N$  结的反向特性曲线重合。

可关断可控硅的主要参数除了可控硅的全部参数外，主要还有控制极关断电流 ( $i_{gro}$ )、控制极关断电压 ( $V_{gro}$ )、关断增益 ( $B_{off}$ )、可关断最大阳极电流  $I_{Aro}$ （在一定的阳极电压  $V_{Aro}$  时）和关断时间  $t_{off}$ 。

#### 4. 结构

在前面已经讲到了可关断可控硅要完成开通和切断电路的任务，而一般可控硅只是完成开通电路的任务。由于任务不同，解决的方法也就不同，反应在具体结构、参数和工艺方面它们是不同的。

图11是可关断可控硅和一般可控硅管芯示意图。

由图1~11 可以看到可关断可控硅和一般可控硅的管芯结构是不同的。为了便于了解，我们作简单的说明。

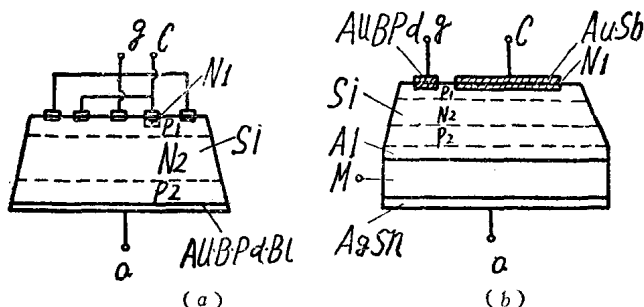


图 11

(a)——可关断可控硅；(b)——一般可控硅。

我们知道一般可控硅它是扩散、烧结工艺制造的。其中  $P_1$  和  $P_2$  层是一次扩散形成，其结深和浓度都是一样。长基区  $N_2$  约在 0.12~0.15 毫米左右，阴极  $N_1$  是合金烧结形成。而可关断可控硅采用双扩散、光刻、真空镀膜烧结形成。它的  $P_1$  和  $P_2$  层是两次扩散形成，浓度、结深都不一样，阴极也是扩散形成。阴极和控制极电极是利用真空蒸铝工艺完成的，就是在阴极和控制极上面蒸发一薄层铝层形成良好的欧姆接触。

可关断可控硅的总装结构如图 12 所示。

可关断可控硅的底座是用 3AD—30 的底座，其引线脚稍有改变，上面有弯头成直角形，硅片和底座之间用钼片连接，阴极、控制极与管脚之间用直径为 0.01 毫米的铝丝超声波压焊，并在管芯表面涂上硅油保护，管帽跟底座用热压焊牢。

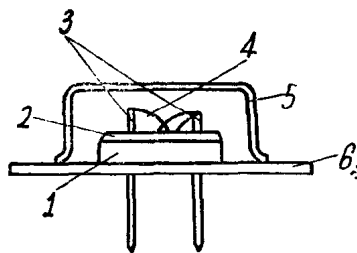


图 12

1—钼片；2—硅片；3—引线脚；  
4—铝丝；5—管帽；6—底座。

## 二 工 艺

### 1. 工艺流程如图13

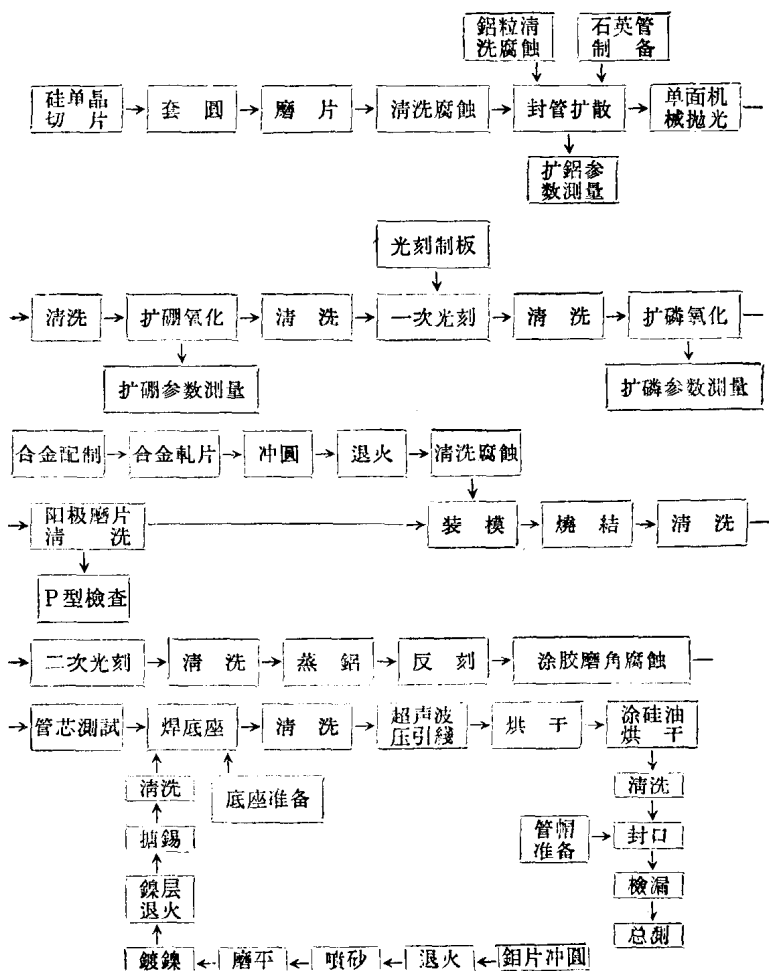


图13 可关断可控硅工艺流程图。