

硅双向可控元件 的原理及应用

一机部整流器研究所

1970.5.

前 言

无产阶级文化大革命是我国社会主义生产力发展的一个强大推动力。近几年来，我国的电子工业进一步呈现出一片蓬蓬勃勃迅猛发展的动人景象。作为电子工业的一个主要组成部分——硅可控整流器和硅整流器行业，发展尤其迅速。正如毛主席所指出的：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”因而在硅可控元件方面，新的品种也在不断出现。为了使可控元件在交流线路及可变极性的直流线路上使用更为方便，就出现了一种新产品——硅双向可控元件。目前这种元件在国内已有较多单位进行试制和生产，同时也已有许多单位正在进行试用。为此，编写这本小册子对这元件作一个较为详细的介绍。由于不致篇幅过长，类似可控元件的概念从略。此外，由于编制仓促，可能有较多的错误，尤其是些图表，是各方面收集拢来的，其数据只能提供参考或仅能提供性能上的大概趋势。今后我们将另外收集一些国内较为成熟的经验，另出专集介绍。

目 录

第一章 概述	(1)
1-1 为什么要发展硅双向可控元件.....	(1)
1-2 硅双向可控元件的特点和应用.....	(2)
1-3 应用硅双向可控元件的特殊问题.....	(3)
第二章 硅双向可控元件的作用原理	(4)
2-1 一般介绍.....	(4)
2-2 短路发射极和 I_+ 特性	(8)
2-3 为什么可以控制反面的可控元件 导通—— I_- 特性	(9)
2-4 I_- 和 I_+ 的二次开通和山包特性.....	(10)
2-5 三方式还是四方式.....	(12)
第三章 应用特性及对元件设计要求	(13)
3-1 额定电压.....	(13)
3-2 额定电流.....	(14)
3-3 控制极特性.....	(15)
3-4 换向特性.....	(18)
3-5 其它特性.....	(24)
第四章 基本工作方式	(25)
4-1 开关工作方式.....	(25)
4-2 相位控制.....	(29)

第五章 使用时应注意的问题	(37)
5-1 $(dV/dt)_c$ 和 $(di/dt)_c$	(37)
5-2 冲击电流	(40)
5-3 变压器负载时的激磁电流	(41)
5-4 散热问题	(46)
第六章 应用线路	(47)
6-1 交流开关电路	(47)
6-2 调压电路	(49)
6-3 调光电路	(50)
6-4 调速电路	(51)
6-5 控温电路	(54)
6-6 伺服系统	(55)
6-7 变频电路	(56)
【附录】	(57)

毛主席语录

人类总得不断地总结經驗，有所发现，有所发明，有所創造，有所前进。停止的論点，悲觀的論点，无所作为和驕傲自滿的論点，都是錯誤的。

第一章 概 述

1-1 为什么要发展硅双向可控元件？

硅可控整流器及其派生产品的出现，在强电领域已引起巨大的技术革新。在实用中对交流功率的控制是一个主要分支。利用硅可控整流器控制交流功率，可采用图 1.1 所示的电路。

其中以图 1.1(a) 所示的反并联方式应用最广，这种电路尽管已被广泛采用，但尚有不足之处。

(1) 在单相电路中就需要两个硅可控整流元件，它们的散热片在电气上应互相绝缘，而同时又需要有良好的散热性能。

(2) 控制电路相对讲来比较复杂，一般都要采用脉冲变压器。

(3) 需要过电压保护措施。

(4) 在电感性负载下，对控制电路有特定的要求。

由于上述原因，硅可控整流器在功率交流控制应用中尚有局限性，因此就提出了发展更适宜的新型半导体元件的要求。

1-2 硅双向可控元件的特点和应用

硅双向可控元件是在应用的要求下发展起来的，它是一种五层、三端(或两端)、双稳态的大功率半导体器件，是硅可控整流器的一种主要的派生品种，它的出现基本上弥补了上述缺点，成为目前控制交流功率的较理想元件。

硅双向可控元件又可分为三端和两端器件。从目前发展趋势来看，作为交流功率的控制元件，由于三端元件触发的方式更为简便，因而发展很快。两端功率元件用在过压保护上较多。两端

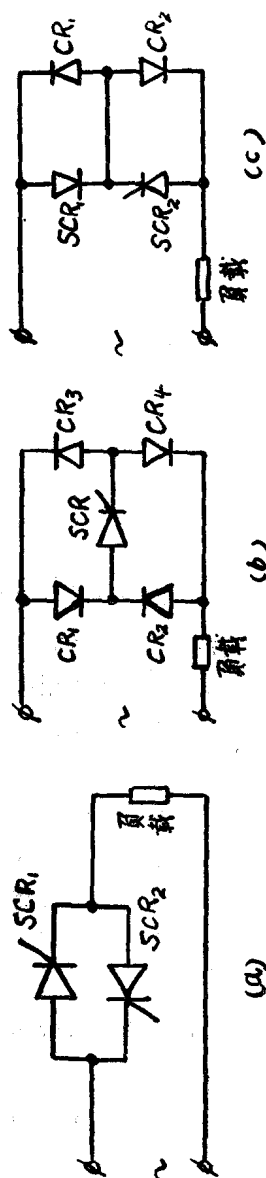


图 1.1.1 采用硅可控整流器的交流控制电路

元件现在主要做成低压的，作为三端元件或一般可控元件的触发管，这种触发管将进一步简化三端双向可控元件的触发线路，因而发展这种触发管将是十分重要的。此外，这种元件在其它一些脉冲发生线路或倍频、限幅、调制线路中都可能得到应用。关于作为触发管的应用，在第四章中将加以说明。并把它称为双向触发管。

本文所指的硅双向可控元件就是指三端元件，它可以取代一对反并联的硅可控整流器，用以控制交流功率或可变极性的直流功率。与反并联的可控元件相比，它的优点是：

(1) 以一代二，使功率元件数目减少一倍，散热片当然也简化了。

(2) 由于功率元件少了，而且双向可控元件要求的控制信号比较灵活，所以控制电路简单了。

(3) 省略了过压保护。

由于上述优点，硅双向可控元件目前已被成功的用在开关、调光、调压、调速、控温、伺服、逆变、程序等控制系统中，作为连续或断续控制的功率元件。

1-3 应用硅双向可控元件的特殊问题

硅双向可控元件主要用来控制交流电路，另外它本身的结构是对称的，由于这些负载和结构上的特点，使得它在应用时有和硅可控元件相同的地方，也有不同的地方。例如换向 dV/dt 能力问题，就是一个新问题。为了保证元件的安全运行，在设计和使用中，就应该注意这些特殊性，本文将重点讨论这些问题。

毛主席语录

马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。

第二章 硅双向可控元件的作用原理

2-1 一般介绍

硅双向可控元件无论从结构上还是从伏安特性来看，都可看作一对反并联可控元件的组合，如图 2.1 所示。

硅双向可控元件通常仍是一个三端元件，而没有像一般理解的，把二个可控元件反并联以后就是一个四端元件了，这一方面为了制造者引出线的方便，一方面也是为了使用者的方便。

图 2.2 再次绘出了双向可控元件的伏安特性，并标出了一些常用符号：如击穿电压 V_B 及漏电流 I_0 、转折电压 V_{B0} 及转折电流 I_{B0} 、维持电流 I_H 、导态电流 I_F 下的压降 V_F 。由图中可见，它的伏安特性总的轮廓是对称的，但双方向的 I_{B0} 、 I_0 、 I_H 、 V_F 都可能有一定的差异。当击穿特性为如图所示的雪崩硬特性时，击穿电压 V_B 的值由硅材料的电阻率所

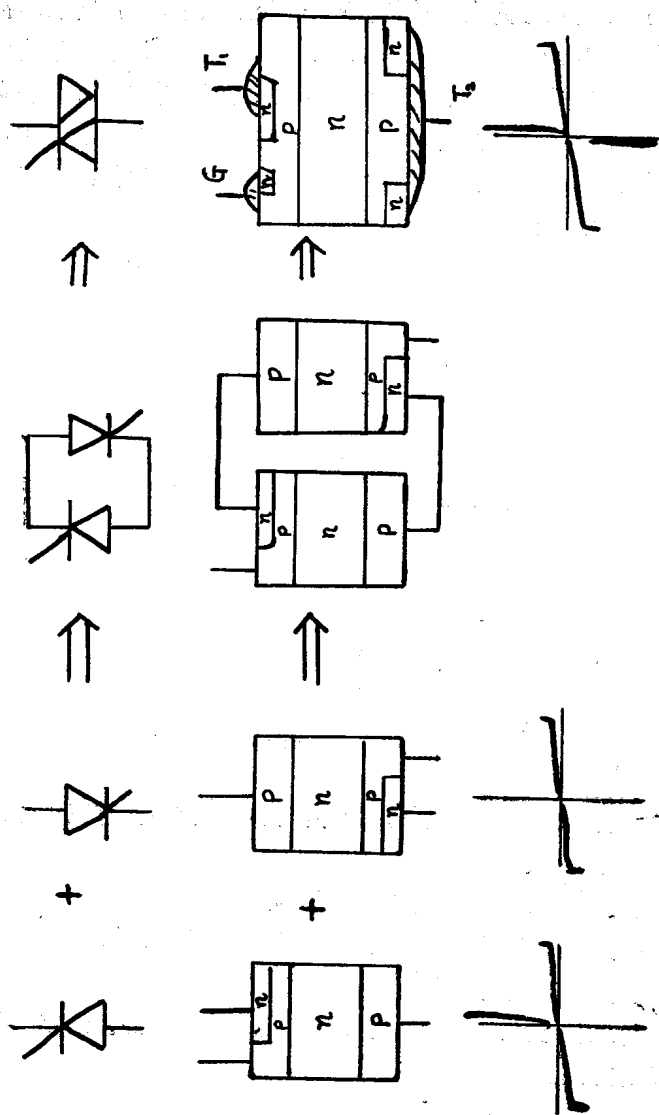


图 2.1 一个双向可控元件代替一对反并联可控元件

决定，因而双方向是对称的。 V_B 一般近似于 V_{B0} ，所以转折电压 V_{B0} 也是对称的。在软特性时， V_B 和 V_{B0} 已经不能区分，双方向的 V_{B0} 常常有较大的差异。上面所指的都是室温下的电压，当结温升高时，双方向的电压随温度的变化可能是不同的。因而在高温下，即使是硬特性的元件，它们的 V_{B0} 还是可能有所差异。

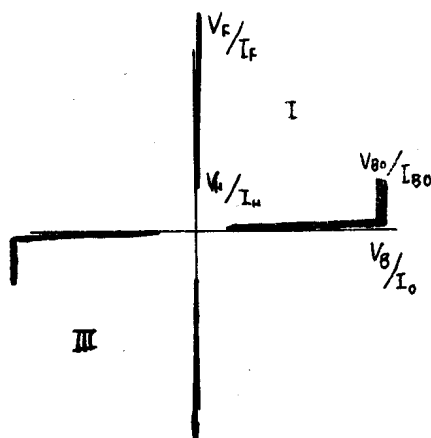


图 2.2 伏安特性

在转折电压 V_{B0} 以下，元件保持阻断特性。有三种方式可以使之导通：

- (1) 外加电压超过转折电压 V_{B0}
- (2) 外加电压有一个较大的电压上升率 dV/dt
- (3) 加触发电流 I_g 。

前二种方式一般很少使用而且是设法避免的。通常用 I_g 触发的方式。

对触发电流 I_g 来说，双向可控元件和一般可控元件有很大不同，因为它有四种触发方式，即 I_+ 、 I_- 、 III_+ 、 III_- ，各种方式的定义可参阅图 2.3。

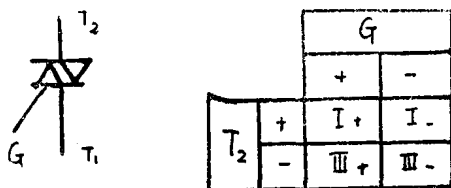


图 2.3 控制信号的定义

说得详细一些，也即是：

(1) 当 T_2 （相当于通常可控元件的阳极）相对 T_1 （相当于通常可控元件的阴极）为正时，若在控制极加上一个相对 T_1 为正的、并具有适当幅度与宽度的信号，（即 I_+ 触发方式）则双向可控元件将在第 I 象限（即通常可控元件的正向）导通，这与通常的可控元件相同。

(2) 第 I 象限时，控制极加负信号，元件也可导通。

（即 I_- ）

(3) 第 III 象限时（即通常可控元件的反向），控制极加负信号，元件也能在通常可控元件的反向导通。（即 III_- ）。

(4) 第 III 象限时，控制极加正信号，多数元件也可导通（即 III_+ ）但某些双向可控元件这种方式的控制电流很大，或制造时故意使它不导通，这在使用时就应该注意。

由上述可见，双向可控元件的触发方式是很灵活的，它可以用直流信号触发，也可用交流信号触发。对具有四种方式触发能力的元件，在用直流信号时和信号的极性无关。对

具有三方式触发能力的元件，则在用直流信号时改变信号的极性就会使输出发生成倍的变化。这些特点，都使双向可控元件的控制电路大为简化。

下面比较详细地说明一下各种触发方式的作用原理。

2-2 短路发射极和 I_+ 特性

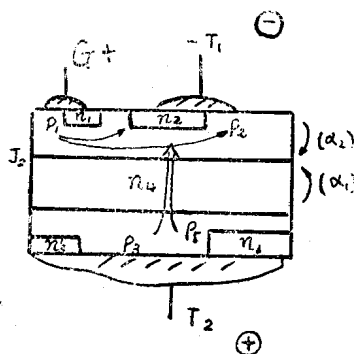


图2.4 I_+ 特性

I_+ 特性相似于通常的可控元件的控制特性，图2.4给出双向可控元件的 I_+ 导通时的电流流通情况。为了使元件可以在第Ⅰ、第Ⅲ象限都导通，所以不能象可控元件那样，阴极上只是 n 型，阳极上只是 P 型，它的 T_1 和 T_2 二个极上，都是

既有 P 型也有 n 型，而且控制极 G 也是如此。这样就必然存在“短路发射极”的结构，现在用 P_1 、 P_2 、 P_3 来表示 G 、 T_1 、 T_2 上连接 P_1 、 P_2 区的欧姆接触。

这里重点介绍一下短路发射极的原理： P_2 并联在发射极 n_2 的边上，就相当于把 n_2 短路了，即称短路发射极。它起的效果是：从控制极来说当， GT_1 间加一 G 为正的偏压时，由于 n_2 被 P_2 短路，所以这个偏压加不到 n_2 上， n_2 仍处于零偏压，控制极电压只产生 P_1P_2 电流。直到 P_1P_2 电流足够大，在 n_2 下的基区上产生一个横向压降约0.5伏时（即 n_2 的左端比右端电势更高些） n_2 才开始受到控制极正向偏

压的作用,才开始向 P_4 区注入电子。正因为如此,当存在短路发射极后,可控元件的控制电流要比通常为大。

从主电路来说也是如此,当主电路电流从 T_2 流向 T_1 时,首先是从 P_2 流出,即 $P_5 n_1 P_4 P_2$, n_2 开始时不向 P_4 区注入电子。这也就是双向可控元件通常温度特性和 dV/dt 能力较好的原因。因为温度上升所增加的漏电流、或是 dV/dt 产生的位移电流首先从 P_2 流走了,不起到增加 α_2 作用的结果。

因而 I_+ 特性、也就是一个具有短路发射极的可控元件的特性。也就是说,当 $P_1 P_2$ 电流一定大以后, n_2 开始向 P_4 区注入电子,这些电子的注入使硅片中的复合中心被饱和而引起少子寿命增加,从而增加了 $n_2 P_4 n_1$ 和 $P_1 n_1 P_4$ 这二个晶体管的放大系数 α_2 和 α_1 , 当 α_1 和 α_2 之和等于 1, 元件就导通了。从物理意义上来说,当 α_2 增大时,在 P_4 区供复合的电子减少了,从 P_5 进来到达 P_4 的空穴因为复合减少而开始在 J_2 结附近积累,同样,电子也在 n_1 区的 J_2 结附近积累,这样原来反向的 J_2 结就被这些空穴电子抵消而成为正向结,元件就导通了。很容易可以算出,积累的条件就是 $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1$ 。

2-3 为什么可以控制反面的可控元件

导通——Ⅲ特性

第Ⅰ象限可以触发导通,这是很容易理解的。但对于第Ⅲ象限,为什么可以用一个做在正面的控制极去控制反面的可控元件导通呢?说明这个问题,实际上也就说明了Ⅲ特性。

为讨论简便,先把短路发射极那部分短路电流忽略掉。

当 T_1 较 G 为正时, (即 III_-) 从 P_2 到 n_1 流过一个电流, n_1 开始向 P_4 注入电子, 这些电子通过 P_4 进入 n_4 , 使 n_4 电势更低一些。这结果是使 J_2 结更为正向。(注意: 第 III 象限的 J_2

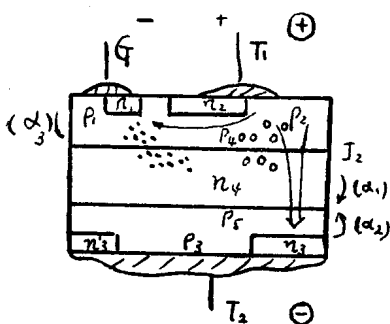


图 2.5 III_- 特性

结本身就是正向的) 于是从 P_2 来的空穴, 就更为容易地进入 n_4 、 P_5 。这个电流引起了 $P_4 n_1 P_5$ 和 $n_3 P_5 n_1$ 这两个晶体管的 α_1 和 α_2 增大, 当 $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1$ 时, $P_4 n_1 P_5 n_3$ 就被导通。

实际上因为短路发射极的存在, 在 P_2 电流流到 n_1 之前, 先有一个 $P_2 P_1$ 的电流; 在 $P_4 n_1 P_5 n_3$ 电流之前, 先有一个 $P_4 n_1 P_5 P_3$ 的电流; 这些结果都是使 III_- 的 I_g 增大。

从设计上来说, 要使 III_- 的 I_g 较小, 除了要增大 α_1 和 α_2 外, $n_1 P_4 n_4$ 晶体管的放大系数 α_3 也应增大, 因为这样更有利于电子注入到 n_4 区, 这也是易于理解的。同时也说明为了使 III_- 导通, 关键是控制极要有一块 n_1 , 这就决定了双向可控元件的控制极必然比较复杂, 既有 P 型也有 n 型。

2-4 I_- 和 III_+ 的二次开通和山包特性

控制极既然既有 P 型又有 n 型, 就必然存在另外二种触发方式, 即 I_- 和 III_+ 。

I_- 其实和 I_+ 完全一样, 只是现在一开始时 G 反而作

为通常的阴极，而 T_1 作为通常的控制极了。这样必然先导致 $P_5n_4P_4n_1$ 开通，当这个小可控元件导通后，才扩展到 $P_5n_4P_4n_2$ 这个大可控元件导通，即经过二次导通的过程。

这二次导通之间存在着一个转换过程。在示波器中，可以看到当元件全导通时，存在着如图 2.7 中 ABC 这样的一个小山包。 OAB 部分表示“小可控”导通， CD 部分表示“大

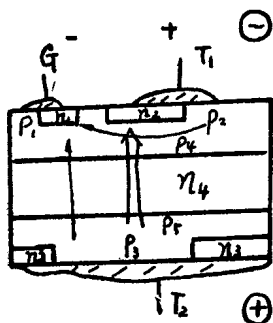


图 2.6 I-特性

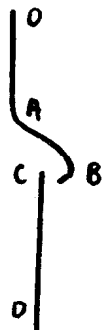


图 2.7 山包

可控”导通，山包表明从 B 到 C 电压有个跳跃。实践证明，当 n_1 与 n_3' 重叠时，山包就大，若 n_1 对在 P_2 时，山包就小，这相当于一个斜的“小可控”与一个正的“小可控”的关系。根据这个发现，我们就可以在制造工艺中注意降低山包。山包通常在 6 伏以下，但也有 12 伏以下甚至更高的，在主电路电源电压很低时使用此元件，必需注意这个问题。

从“小可控”到“大可控”转换时，可以看到控制极电压骤然下降甚至达到负值。这现象的产生是由于从 P_1 到 P_2

忽然产生一个反方向（从 G 到 T_1 ）的电流，好象 I_g 换向一样。所以在使用此元件时，要注意给出的 I_- （ III_+ 也如此）的控制极电压是跳跃前电压还是跳跃后电压，作为触发功率来说，应采用跳跃前的电压。

III_+ 实际上是 I_- 和 III_- 两种特征的组合。和 III_- 的区别只是把 T_1 和 G 的极性换了一下，它所以能够使第 III 象限导通的机理和 III_- 是相同的。但它在开始导通时又象 I_- 那样，首先是 $P_1P_4n_4P_5n_3'$ 这个“小可控”导通，然后再转换为 $P_2P_4n_4P_5n_3$ 导通，所以也可能存在一个转换的山包。

2-5 三方式还是四方式

通常的双向可控元件常有 I_+ 、 I_- 、 III_+ 、 III_- 四种触发方式。在实际产品中， III_+ 控制电流往往很大。所以在触发功率不够大时，还是要注意控制极的极性问题。即对有些 III_+ 控制电流过大的或甚至不能导通的元件，使用直流信号时应该用 I_- 、 III_- 二种方式，以免用 I_+ 、 III_+ 时实际上只有 I 象限导通，在某种条件下，甚至要导致元件损坏。

在某些制造工艺和结构中，为了改进元件的换向能力，往往故意减弱 III_+ 导通的能力，即故意制造只能三方式触发的元件。从应用角度来讲，有些用户还欢迎这种元件，即当控制极为正信号时，只有正半波输出，为负信号时，才是全波输出，更进一步加强了应用的灵活性。

关于换向特性的工作原理，放在下章中叙述。

毛主席语录

一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能完成。

第三章 应用特性及对元件 设计要求

3-1 额定电压

硅双向可控元件通常给出的电压是指元件的转折电压（有时也降低100伏）。它和可控元件的区别是双向都能导通，所以过电压时只导致一次误触发，元件不至于损坏。

（过压时须没有过电流，若产生过电流或过大 di/dt ，元件也要损坏）元件的雪崩击穿特性和短路发射极结构都进一步保证了其耐过压的能力。

因此双向可控元件的使用电压通常取得较高，例如，220伏有效值电源时用500伏元件，依此类推。

双向可控元件的电压温度特性通常如图3.1所示，可见若在室温下电压和某一可控元件相同的话，在高温时电压就较之为高。所以结温可以稍用高些，当然考虑其它一些能力，如换向 dV/dt 等，结温使用低些也是合理的。