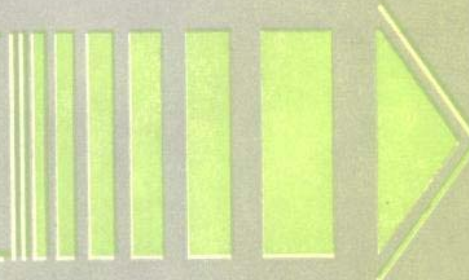


双向可控硅及其应用



冶金工业出版社

双向可控硅及其应用

上海市冶金工业局 编

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书是专门介绍双向可控硅及其应用的科技书。全书共分五章。第一、二章扼要介绍双向可控硅元件的性能和触发原理。第三、四、五章比较详细地介绍双向可控硅作为交流电子开关应用的原理及电路，并以双向可控硅应用于轧机升降台动力制动为例，进行了说明，此外，还介绍了双向可控硅在调压调速系统中应用的情况。

本书以结合有关理论总结实践经验为主，理论联系实际，有实用价值。

本书可供技术工人学习和使用，亦可供科技人员参考。

双向可控硅及其应用

上海市冶金工业局 编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街崇文门北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张3 $\frac{1}{2}$ 插页 2 字数88千字

1985年9月第一版 1985年9月第一次印刷

印数00,001~5,450册

统一书号：15062·4233 定价0.65元

前 言

双向可控硅（又称双向晶闸管）具有良好的通断特性，既可作为无触点开关，取代其它动作慢、噪音大、易出事故的电器元器件，又可用于电子计算机的外围设备，如微型电子计算机的执行机构等。此外，在迅速发展的节能和交流调速技术中，双向可控硅也大有用场。总之，双向可控硅在国民经济许多部门的应用，有着广阔的前景。

在上海市冶金工业局机动处的倡导和组织下，主要根据双向可控硅在上海市冶金工业系统的实际应用经验，编写了本书。

本书介绍了双向可控硅的主要技术性能和典型应用电路，并举例介绍实际应用情况。

本书是在黄厚锡高级工程师的指导下进行编写的；参加编写的人员有吴国良、高孝棠、钱祥焕、王照清、谢友杉、周镇国、徐文伯和陆宪忠等。

由于双向可控硅技术发展非常迅速，因此本书中使用的某些术语，与目前实际情况相比可能略有出入。

编者希望本书能对推广双向可控硅的应用，进而促进四化建设起微小的作用。

由于编者水平所限，加之技术发展极其迅速，所以书中不妥之处在所难免，衷心希望广大读者指正。

编 者

1983年5月30日于上海

目 录

第一章 双向可控硅元件	1
一、基本结构	1
二、表示符号、型号、主电压—电流特性	3
三、触发方式	4
四、工作原理	5
(一) 常规门极和 I ₊ 触发方式	6
(二) 结门极和 I ₋ 触发方式	8
(三) 间接门极和 III ₋ 触发方式	10
(四) 间接门极和 III ₊ 触发方式	11
五、换向	15
第二章 双向可控硅的技术参数与触发元件	20
一、主要技术参数	20
(一) 伏—安特性曲线	20
(二) 额定通态平均电流和额定通态平均电压 (通态伏—安特性)	23
(三) 门极可触发电流 I_{GT} 和门极可触发电压 V_{GT}	25
(四) 维持电流 I_H 和擎制电流 I_L	27
(五) 浪涌电流 I_{TSM}	27
(六) 断态电压临界上升率 $\frac{dV}{dt}$	29
(七) 通态电流临界上升率 $\frac{di}{dt}$	33
(八) 换向电流临界下降率 $\left(\frac{di}{dt}\right)_c$	34
(九) 结温	37
二、触发元件	37
(一) 氖管	38
(二) 触发双向二极管 (Diac)	39
(三) 单结晶体管 UJT	41

(四) 程控单结晶体管PUT	43
(五) 集成触发元件	45
第三章 双向可控硅交流开关	48
一、常用双向可控硅触发电路	48
二、常用双向可控硅交流开关的工作原理	50
(一) 继电器触发的正反向可逆式交流开关	51
(二) 转子回路交流开关	56
三、使用双向可控硅交流开关时的几个问题	56
(一) 线绕式电动机转子回路电阻的选择	56
(二) 额定通态电流及电压的选择	58
(三) 双向可控硅元件的换向能力	59
第四章 带动力制动环节的双向可控硅开关	60
一、交流电动机的动力制动(直流能耗制动)简介	60
(一) 基本原理	60
(二) 动力制动特性曲线	60
二、带动力制动环节的双向可控硅开关的种类和性能	64
(一) 继电器-接触器动力制动系统的控制电路	64
(二) 带动力制动环节的双向可控硅开关的工作原理	64
(三) 开关功能的比较	66
三、带动力制动环节的双向可控硅开关的原理结构与 使用注意事项	68
(一) 分列式开关	68
(二) 交直流合一式开关	69
(三) 使用注意事项	82
第五章 双向可控硅在交流调压调速系统中的应用	84
一、交流调压简介	84
(一) 单相交流调压	84
(二) 三相交流调压	92
二、双向可控硅调压调速系统	96
(一) 三相异步电动机的调压调速特性	96
(二) 三相异步电动机调压调速的特点和应用范围	97
(三) 双向可控硅调压调速系统在滚轮式热锯机上的应用	99

电流容量不同的双向可控硅元件时，采用不同的冷却方式，小功率的一般采用自然冷却；中功率的一般采用强迫风冷；大功率的，则可根据需要选用强迫风冷或液体冷却。

在使用平板压接型双向可控硅元件时，不允许随意拧动紧固散热器的螺丝，这是因为散热器与管心之间压接的松紧程度，在元件出厂时已调整好，如果把螺丝再拧紧一些，便有可能造成管心中的硅晶体碎裂，从而使元件立即损坏。但是，值得注意的是，有时这种由应力造成的损伤，要在事后很久才导致元件突然损坏。如果把紧固螺丝拧松一些，则管心与散热器之间的热阻、电阻将显著增加（通常平板压接型元件的主电极是通过散热器引出的）。元件在这种状态下使用，负荷能力和使用寿命将会下降和缩短，甚至可能会迅速损坏。

双向可控硅元件的核心部分，是集成在一块硅单晶片上、具有公共门极的一对反并联普通可控硅，其结构如图 1-2 所示。其中， N_2 区和 P_2 区的表面被整片金属膜连通，构成双向可控硅的一个主电极，此电极的引出端子称为主端子，用 T_2 表示； N_3 区和 P_2 区的一小部分，被另一金属膜连通，构成反并联的一对主可控

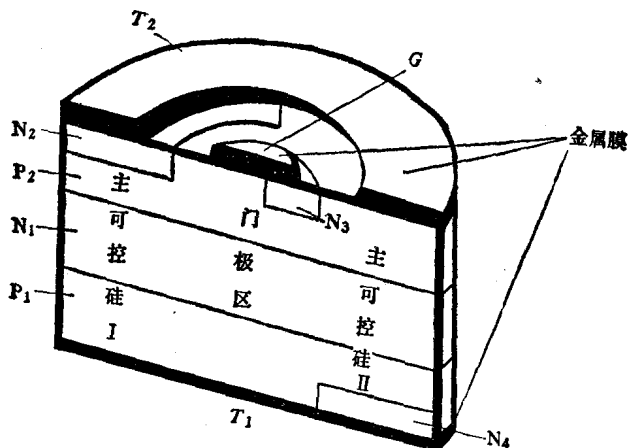


图 1-2 双向可控硅的结构

硅的公共门极端，用G表示。P₁区和N₄区被金属膜连通，构成双向可控硅的另一个主电极，引出此电极的端子也称为主端子，但用T₁表示。P₁-N₁-P₂-N₂和P₂-N₁-P₁-N₄分别构成双向可控硅中一对反并联的可控硅的主体，即主可控硅Ⅰ和Ⅱ。P₁-N₁-P₂-N₃和N₁-P₂-N₃构成门极可控硅和门极晶体管。具有上述结构的硅单晶片安上衬底，经过封装就形成了双向可控硅元件的管心。管心配以合适的散热器就组成了完整的双向可控硅元件。

二、表示符号、型号、主电压—电流特性

双向可控硅元件是五层三端的硅半导体闸流元件。如前所述，它有三个引出端，即T₁、T₂和G。T₁和T₂是主端，G是门极端（控制极）。应注意，门极G和T₂是从元件的同一侧引出的；元件的另一侧只有一个引出端，即T₁。双向可控硅元件的表示符号如图1-3所示。

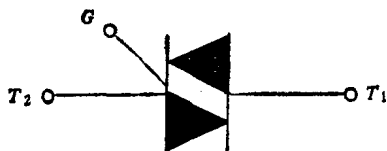
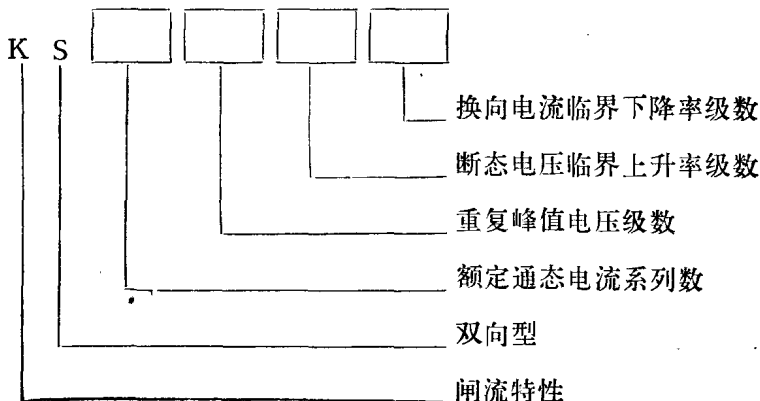


图 1-3 双向可控硅元件的表示符号

JB 2173—77标准对双向可控硅元件的型号作了如下规定：



示例：

KS 200-10-51, 表示：双向可控硅元件的额定通态电流 $I_T = 200$ 安培；断态重复峰值电压 $V_{DRM} = 1000$ 伏；断态电压临界上升率 $\frac{dV}{dt} \geq 500$ 伏/微秒；换向电流临界下降率 $\left(\frac{di}{dt}\right)_c \geq 1\% I_T / \text{微秒}$ （即 2 安培/微秒）。有关KS型双向可控硅元件的系列和级的划分，请参阅表2-3。

在直角坐标系中，双向可控硅元件的主电压—电流特性（伏安特性）曲线，由以坐标原点为中心，基本对称的两部分组成，这两部分分别位于第 I 和第 III 象限。在图1-4中， I_H 为维持电流； V_{DSM} 为断态不重复峰值电压； V_{DRM} 为断态重复峰值电压，规定 $V_{DRM} = 80\% V_{DSM}$ 。

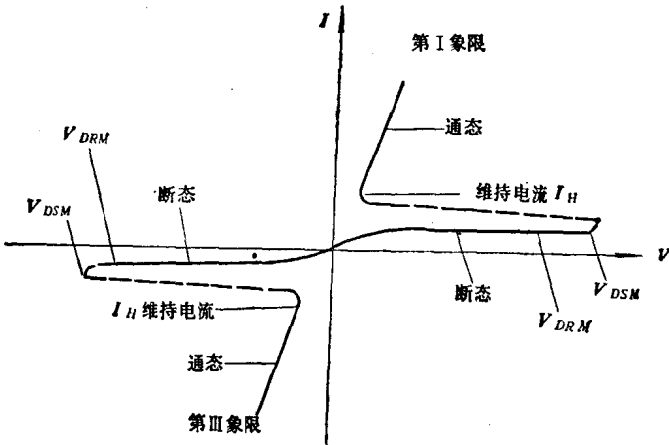


图 1-4 双向可控硅元件的主电压—电流特性曲线

三、触发方式

双向可控硅元件的主端在不同极性下均具有导通和阻断的可能；从理论上讲，都能以正、负门极电流进行触发。按照门极极性和主端子极性的可能组合，双向可控硅元件有四种触发方式（见表1-1），即：

表 1-1 四种触发方式

相对于主端子 T_2 的极性		门 极 端 极 性	
		+	-
主端子 T_1 的极性	+	I+	I-
	-	III+	III-

I₊触发方式：主特性曲线在第 I 象限 (T_1 为正)，门极的极性相对于 T_2 为正；

I₋触发方式：主特性曲线在第 I 象限 (T_1 为正)，门极的极性相对于 T_2 为负；

III₊触发方式：主特性曲线在第 III 象限 (T_1 为负)，门极的极性相对于 T_2 为正；

III₋触发方式：主特性曲线在第 III 象限 (T_1 为负)，门极的极性相对于 T_2 为负。

KS型双向可控硅元件由于结构关系，采用III₊触发方式时需门极功率相当大，所以难以采用III₊触发方式进行触发。在实际工作中，只能在I₊、I₋、III₋的两个组合(I₊-III₋或I₋-III₋)组中任选一组。若错选I₊、III₊或I₋、III₊进行触发，就会失败。

四、工作原理

欲使双向可控硅元件中通过交流电流，必须在每半个电流周期对元件进行一次触发；只有在元件中通过的电流大于擎住电流后，才能在去掉触发脉冲后维持元件继续导通；只有当元件中通过的电流下降到维持电流以下时，元件才能关断，并恢复阻断能力；元件过零关断后，必须再次进行触发才能重新导通。线路上的电压超过双向可控硅元件的不重复峰值电压，线路上的 $\frac{dV}{dt}$ 超过元件的额定 $\frac{dV}{dt}$ ，线路上的换向要求超过元件的换向能力，具备这三个条件中的一个，就可使元件不经触发也能从断态转为通

态。值得注意的是，在上述条件下导通，往往会导致元件损坏。

通过双向可控硅元件的交流电流，若在半周期由主端 T_1 经主可控硅 I 流向主端 T_2 ，则在相邻的半个电流周期中，将由主端 T_2 经主可控硅 I 流向主端 T_1 。所以在交流电路工作的双向可控硅元件的两个半侧，在每一个电流周期中，先后各自工作半个周期。

门极对双向可控硅元件的作用，可分为常规门极作用，结门极作用和间接门极作用。本节将分别讨论在上述四种触发方式中门极对双向可控硅元件导通所起的作用。

(一) 常规门极和 I_+ 触发方式

当双向可控硅元件的主端 T_1 相对于主端 T_2 为正偏，门极 G 相对于 T_2 为正偏，门极电压相对于 j_3 结为正偏，相对于 j_4 结为反偏时，可以认为这时的门极电流 I_g 有两条通道，即通道 1 和通道 2（见图 1-5）。若沿通道 1 流动的门极电流是 I_{g1} ，沿通道 2 流动的门极电流是 I_{g2} ，则 $I_g = I_{g1} + I_{g2}$ 。此时， I_{g2} 对主可控硅 I 的触发不起作用。

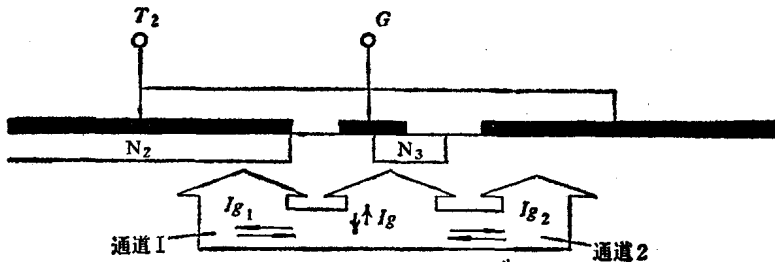


图 1-5 门极电流的路径

为了便于讨论门极电流 I_{g1} 与主可控硅 I 导通的关系，可以把主可控硅 I 看成是图 1-6 所示的晶体管电路。设晶体管 $P_1-N_1-P_2$ 的电流放大系数为 α_1 （共基极电流放大系数），发射极电流为 I_{T1} ，集电极电流为 I_{CP} ，再设晶体管 $N_2-P_2-N_1$ 的电流放大系数为 α_2 ，发射极电流为 I_{T2} ，集电极电流为 I_{CN} ，则

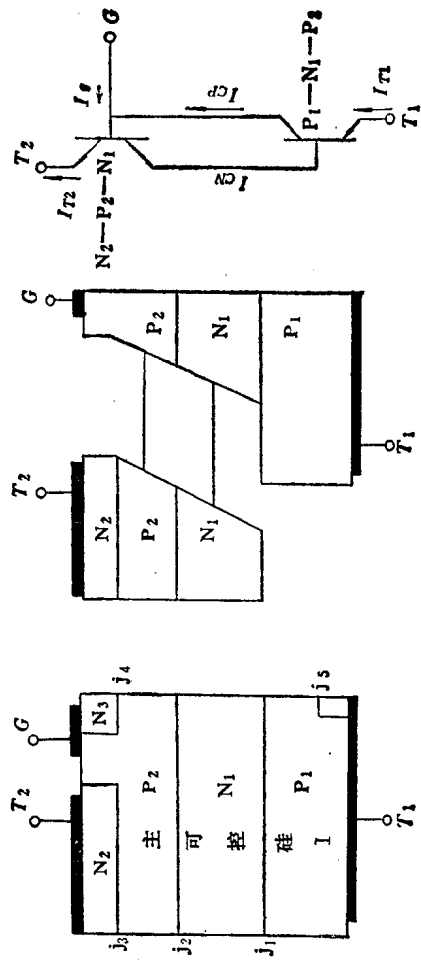


图 1-6 常规门极原理结构图

$$\alpha_1 = \frac{I_{CP}}{I_{T1}} \quad (1-1)$$

$$\alpha_2 = \frac{I_{CN}}{I_{T2}} \quad (1-2)$$

I_{o1} 为向主可控硅 I 施加的门极电流，因而有下述关系（不考虑漏电流）：

$$I_{T2} = I_{T1} + I_{o1} \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} I_{T1} &= I_{CP} + I_{CN} \\ &= \alpha_1 I_{T1} + \alpha_2 I_{T2} \end{aligned} \quad (1-4)$$

从式1-3、式1-4可得

$$I_{T1} = \frac{\alpha_2 I_{o1}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-5)$$

晶体管的发射极电流与电流放大系数 α 之间的关系是：晶体管的基极电流 I_b 增大，管子的发射极电流 I_e 亦随之增大；晶体管发射极的电流增大，管子的电流放大系数 α 将发生变化。在可控硅中，电流放大系数 α_1 、 α_2 与发射极电流 I_e 的关系曲线，如图1-7所示。

在主可控硅 I 中，门极电流 I_{o1} 增大，发射极电流 I_{CN} 亦增大； I_{CN} 增大， α_2 随之迅速增大，与此同时 α_1 也增大。当 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 时，式1-5中的 $I_{T1} \rightarrow \infty$ 。主电流 $I_{T1} \rightarrow \infty$ 表明，主可控硅 I 由断态转为通态。双向可控硅元件中的主可控硅 I 导通后，其本身的压降下降至 1 伏左右。这时，通过主可控硅 I 的电流，由线路上的电压和负载电阻来决定。与此同时，双向可控硅元件中的主可控硅 II，相当于一个承受反偏压的普通可控硅，处于阻断状态。

(二) 结门极和 I-触发方式

所谓结门极就是指本身含有 P-N 结的门极。如果双向可控硅元件的 T_1 端相对于 T_2 端为正偏，门极 G 相对于 T_2 端为反偏，则主可控硅 II 仍然相当于一个承受反偏压的普通可控硅。由于主可控硅 I 的发射极 N_2 与基极 P_2 被金属膜连通，所以两极的电位相等。基极 P_2 相对于结门极的发射极 N_3 为正偏。此时， j_3 结处于瞬

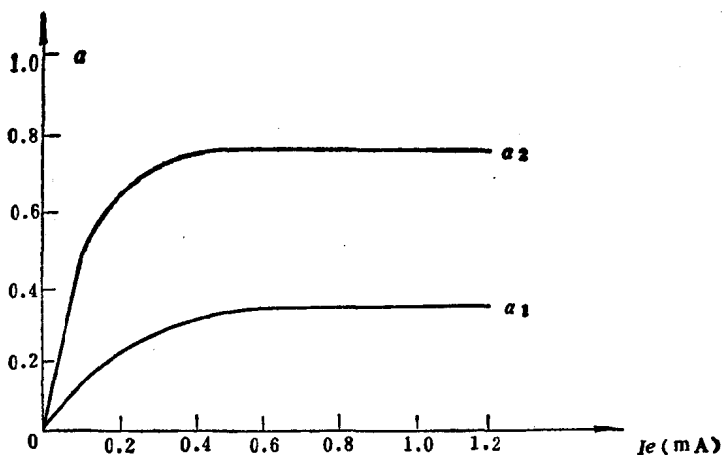


图 1-7 电流放大系数 α 与发射极电流 I_e 的关系

时反偏态，不起作用。由于 T_2 端的电位高于 G 端，所以 T_2 端下的 P_2 区成为门极可控硅 $P_1-N_1-P_2-N_3$ 的基极，经过通道2的门极电流 I_{G2} 也就成为门极可控硅 $P_1-N_1-P_2-N_3$ 的触发电流。这样，当 I_{G2} 足够大时，门极可控硅便导通。

门极可控硅一旦导通，门极电位将迅速升高至接近 T_1 端电位。因为通过门极的电流受门极外电阻 R_G 的限制，所以注入 P_1 区的空穴将在 N_3 下面的 P_2 区堆积起来，并向 N_2 方向横向移动，形成主可控硅 I 的门极电流 I_{B2} （图1-8）。

由 N_3 区注入到 N_2 区的电子为 j_2 结所收集； N_1 区的一部分电子与 P_1 区注入到 N_1 区的空穴复合，多余的电子在 N_1 区堆积起来。这些堆积起来的电子将沿横向流向主可控硅 I。由于 N_1 基区的电阻远远大于 P_2 基区的电阻，所以，这股由电子形成的电流与空穴形成的电流 I_{B2} 相比，作用显得很小，可以忽略不计。

主可控硅 I 的导通依赖于触发电流 I_{B2} ，门极可控硅 $P_1-N_1-P_2-N_3$ 导通后， P_2 区的电位迅速升高到 T_1 端的电位。一般使用情况下，主端电压总是高于门极电压的，所以 I_{B2} 足以使主可控硅 I 导通。因而，门极可控硅的导通条件也就成了主可控硅 I 的导

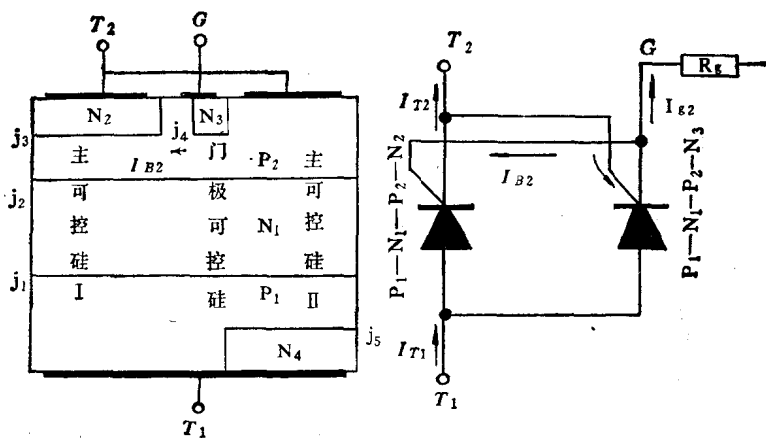


图 1-8 结门极原理结构图

通条件。据此，I-触发方式可用下式表述：

$$I_{T1} = \frac{\alpha_3 I_{G2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_3)} \quad (1-6)$$

式中 I_{T1} ——主电流；

I_{G2} ——流经通道 2 的门极电流；

α_3 ——晶体管 $N_3-P_2-N_1$ 的电流放大系数；

α_1 ——晶体管 $P_1-N_1-P_2$ 的电流放大系数。

当 $\alpha_1 + \alpha_3 = 1$ 时， $I_{T1} \rightarrow \infty$ ，主可控硅 I 被触发导通。

(三) 间接门极和 II-触发方式

间接门极又称为遥远门极，即“remote gate”。

双向可控硅元件的 T_1 端相对于 T_2 端为反偏，门极 G 相对于 T_2 端为反偏时，主可控硅 I 和主可控硅 II 的关系和前两种触发情况相比，发生了颠倒。此时，主可控硅 I 成为一个承受反偏压的可控硅，它不可能被触发导通；主可控硅 II 则成为一个具有 N 型门极的可控硅，它的触发导通原理和具有门极的普通可控硅完全相同，但门极电流改由晶体管 $P_1-N_1-P_2$ 的 N 基极引入 (图 1-9)。

设 I_{B2} 是主可控硅 II ($P_2-N_1-P_1-N_4$) 的门极电流， α_1 是晶体管 $P_2-N_1-P_1$ 的电流放大系数， α_4 是晶体管 $N_4-P_1-N_1$ 的电流放大

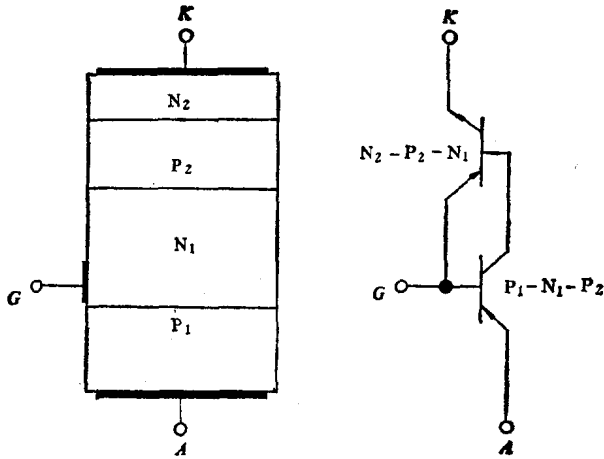


图 1-9 N型门极可控硅的结构

系数，则Ⅲ-触发方式可用下式表述：

$$I_{T1} = \frac{\alpha_1 I_{B1}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_4)} \quad (1-7)$$

当 $\alpha_1 + \alpha_4 = 1$ 时，具有N型门极的可控硅 $P_2-N_1-P_1-N_4$ 被触发导通（图1-10）。

设晶体管 $N_3-P_2-N_1$ 的电流放大系数为 α_3 ，发射极电流（即流经通道2的门极电流）为 I_{G2} ，集电极电流为 I_{B1} ，则

$$I_{B1} = \alpha_3 I_{G2}$$

据此，又可用下式表述Ⅲ-触发方式：

$$I_{T1} = \frac{\alpha_1 \alpha_3 I_{G2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_4)} \quad (1-8)$$

由式1-8很容易看出，Ⅲ-触发方式所需的门极电流较大。

（四）间接门极和Ⅲ+触发方式

Ⅲ+触发方式对KS型双向可控硅元件虽然没有实用价值，但是，如果适当改动元件的结构，也能造出可用Ⅲ+触发方式触发的双向可控硅元件。

双向可控硅元件的 T_1 端相对于 T_2 端为反偏，门极 G 相对于