

特种器件原理简介

——晶闸管（可控硅）

概述

- 晶闸管 SCR (Silicon Controlled Rectifier)
又称：晶体闸流管 (Thyristor) ， **可控硅整流器**。
- 1956 年美国贝尔实验室 (Bell Lab) 发明了晶闸管；
- 1957 年美国通用电气公司 (GE) 开发出第一只晶闸管产品；
- 1958 年商业化；开辟了电力电子技术迅速发展和广泛应用的崭新时代；
- 20 世纪 80 年代以来，开始被性能更好的全控型器件取代。

概述

- 一种以硅单晶为基本材料的 P1N1P2N2 四层三端器件，由于它特性类似于真空闸流管，所以国际上通称为硅**晶体闸流管**，简称**晶闸管 Thyristor**。又由于晶闸管最初应用于可控整流方面所以又称为硅可控整流元件，简称为**可控硅**（ Silicon Controlled Rectifier ——SCR ）。

概述

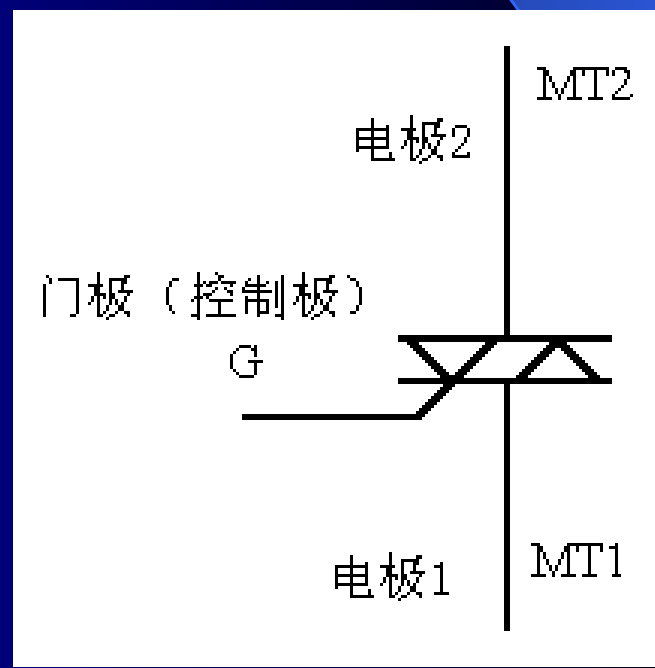
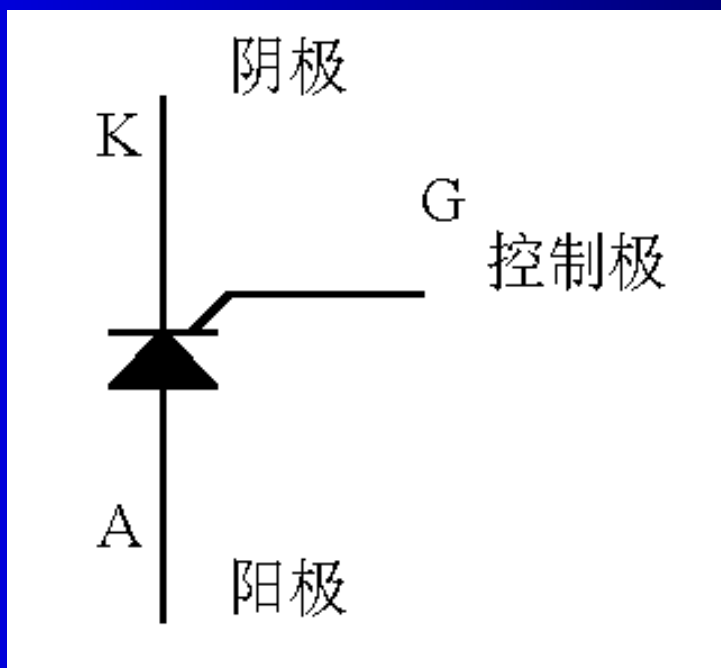
- 在性能上，可控硅不仅具有单向导电性，而且还具有比硅整流元件（俗称“死硅”）更为可贵的可控性。它只有导通和关断两种状态。
- 可控硅能以毫安级电流控制大功率的机电设备，如果超过此频率，因元件开关损耗显著增加，允许通过的平均电流会降低，此时，标称电流应降级使用。
- 晶闸管可分单向晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管、逆导晶闸管、可关断晶闸管、快速晶闸管，等等。

概述

- 可控硅的**优点**很多，例如：以小功率控制大功率，功率放大倍数高达几十万倍；反应极快，在微秒级内开通、关断；无触点运行，无火花、无噪音；效率高，成本低等等。
- 可控硅的**弱点**有静态及动态的过载能力较差；容易受干扰而误导通。

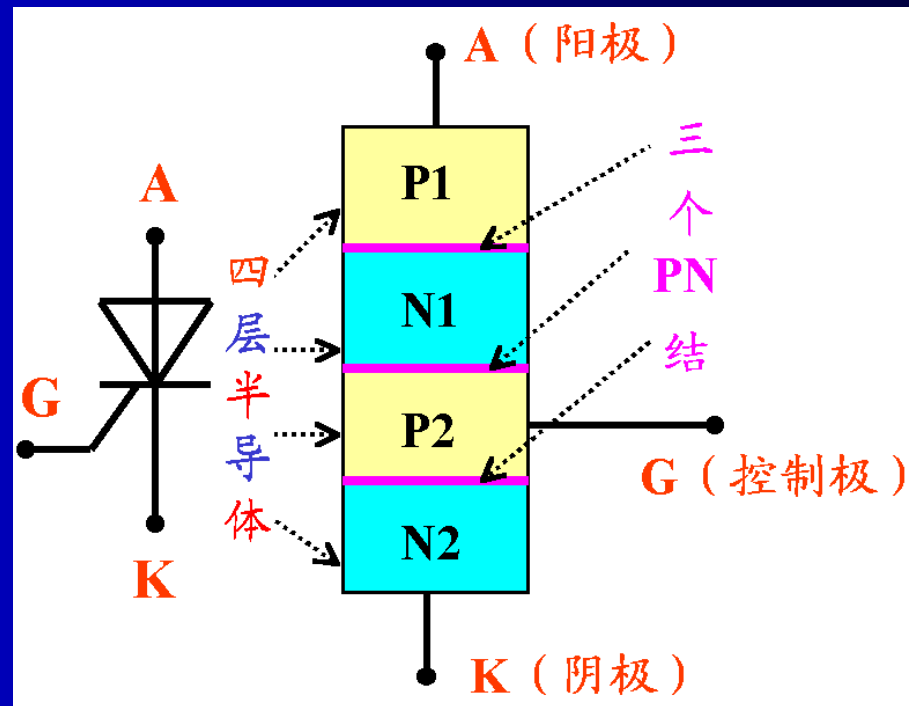
概述

- 普通可控硅主要用于大功率的交直流变换、调压等。
- 双向可控硅主要用于电机控制、电磁阀控制、调温及调光控制等方面。
- 可控硅的三个电极分别用字母 **A** (表示阳极)、**K** (表示阴极)、**G** (表示门极)。



单向可控硅的结构

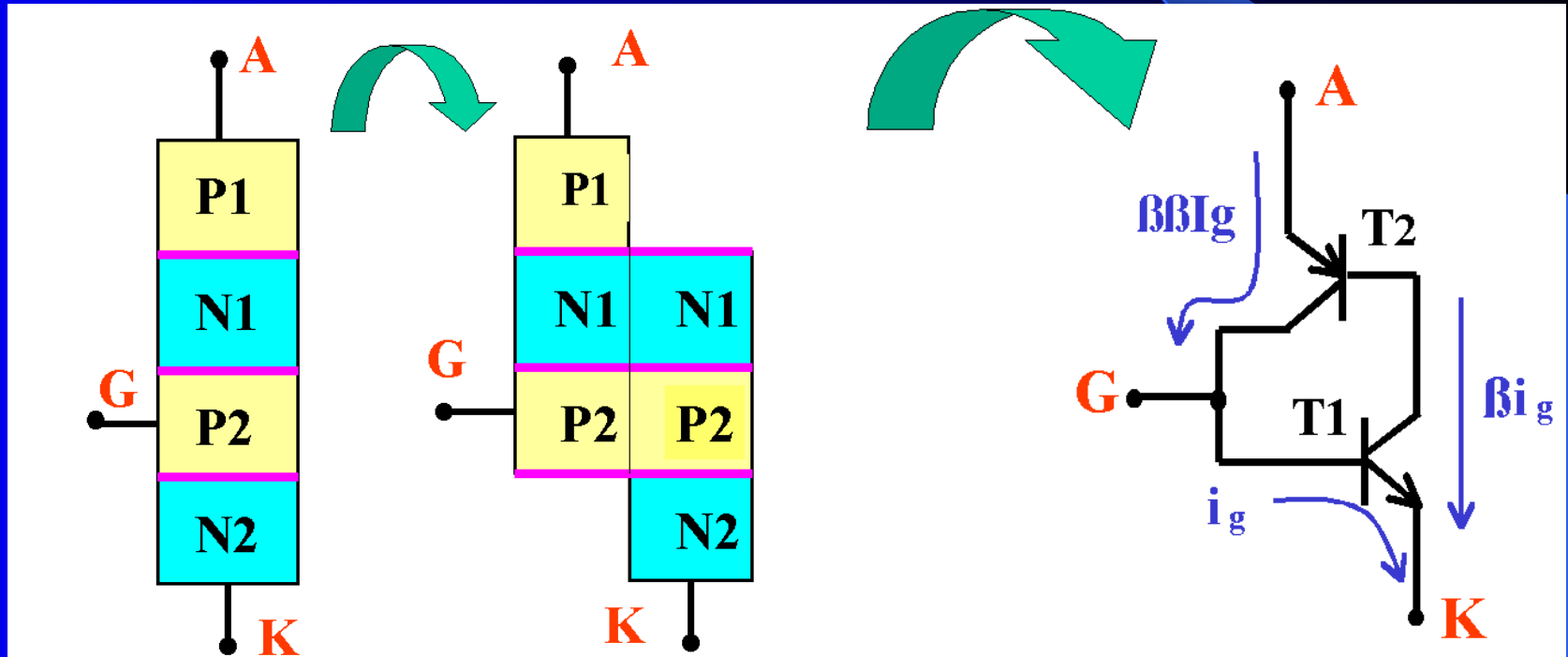
- 不管可控硅的外形如何，它们的管芯都是由 P 型硅和 N 型硅组成的四层 P1N1P2N2 结构。它有三个 PN 结（J1、J2、J3），从 J1 结构的 P1 层引出阳极 A，从 N2 层引出阴极 K，从 P2 层引出控制极 G，所以它是一种四层三端的半导体器件。



可控硅结构小总图和对号图

单向可控硅的工作原理

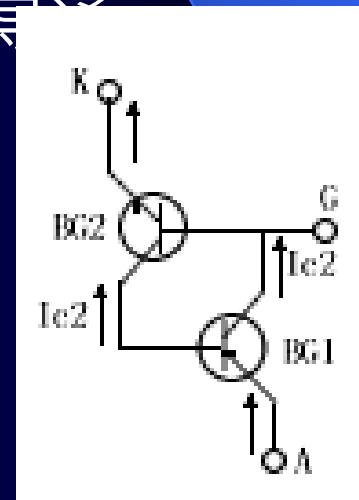
- 可控硅是 P1N1P2N2 四层三端结构元件，共有三个 PN 结，分析原理时，可以把它看作由一个 PNP 管和一个 NPN 管所组成，其等效图解如下图所示：



- 可控硅等效图解图

单向可控硅的工作原理

- 当阳极 A 加上正向电压时，BG1 和 BG2 管均处于放大状态。此时，如果从控制极 G 输入一个正向触发信号，BG2 便有基流 I_{b2} 流过，经 BG2 放大，其集电极电流 $I_{c2} = \beta_2 I_{b2}$ 。因为 BG2 的集电极直接与 BG1 的基极相连，所以 $I_{b1} = I_{c2}$ 。此时，电流 I_{c2} 再经 BG1 放大，于是 BG1 的集电极电流 $I_{c1} = \beta_1 I_{b1} = \beta_1 \beta_2 I_{b2}$ 。这个电流又流回到 BG2 的基极，表成正反馈，使 I_{b2} 不断增大，如此正向反馈循环的结果，两个管子的电流剧增，可控硅使饱和导通。
- 由于 BG1 和 BG2 所构成的正反馈作用，所以一旦可控硅导通后，即使控制极 G 的电流消失了，可控硅仍然能够维持导通状态，
- 由于触发信号只起触发作用，没有关断功能，所以这种可控硅是不可关断的。



单向可控硅的工作原理

- 由于可控硅只有导通和关断两种工作状态，所以它具有开关特性，这种特性需要一定的条件才能转化，此条件见下表：

状态	条件	说明
从关断到导通	1、阳极电位高于是阴极电位 2、控制极有足够的正向电压和电流	两者缺一不可
维持导通	1、阳极电位高于阴极电位 2、阳极电流大于维持电流	两者缺一不可
从导通到关断	1、阳极电位低于阴极电位 2、阳极电流小于维持电流	任一条件即可

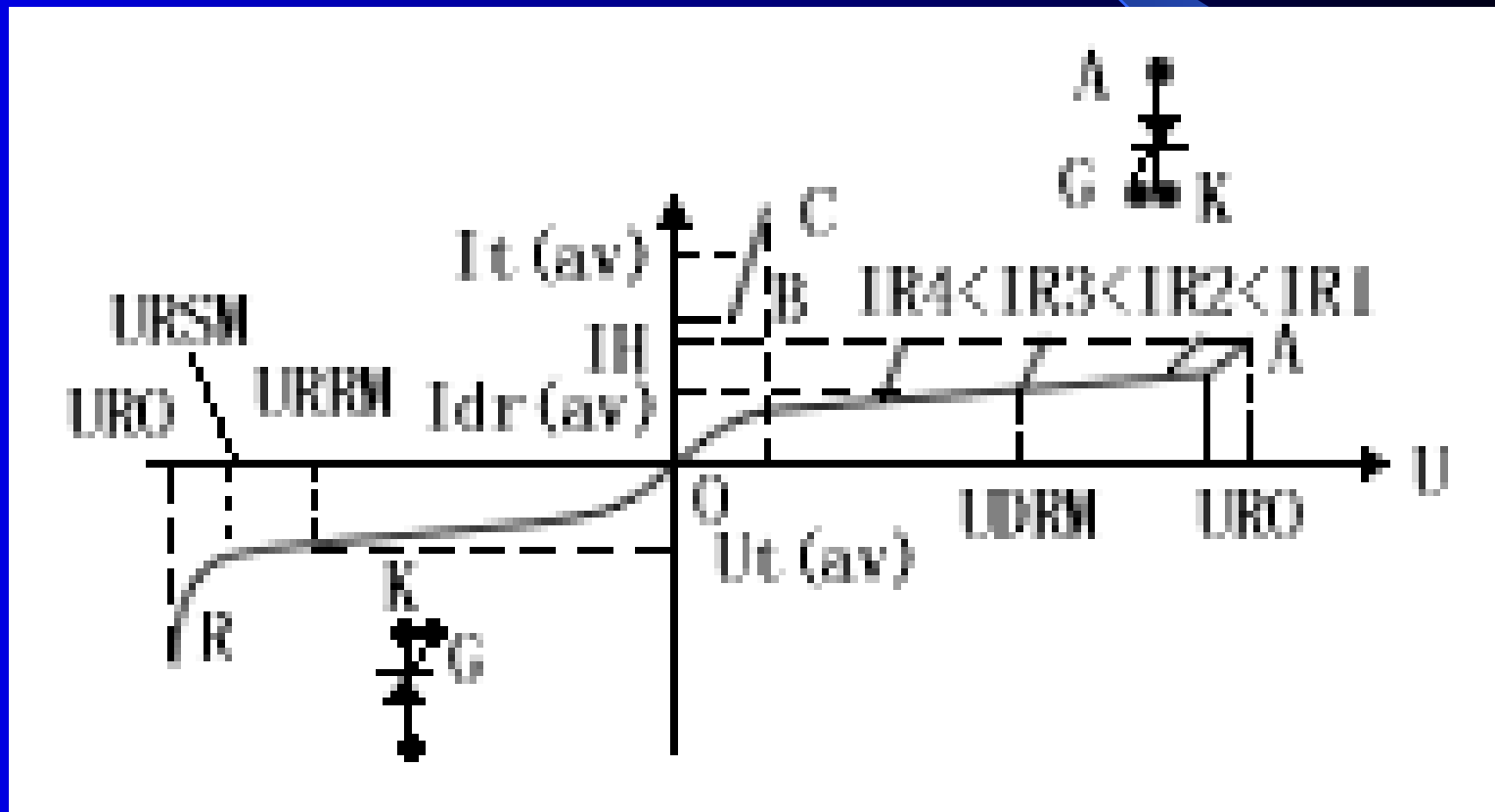
单向可控硅的基本特性

1. 静态特性

- 承受反向电压时，不论门极是否有触发电流，可控硅都不会导通；
- 承受正向电压时，仅在门极有触发电流的情况下可控硅才能开通；
- 可控硅一旦导通，门极就失去控制作用；
- 要使可控硅关断，只能使可控硅的电流降到接近于零的某一数值 I_H 以下（包括阳极电位低于阴极电位）。
- 从这个角度可以看出，SCR 是一种电流控制型的电力电子器件。

单向可控硅的基本特性

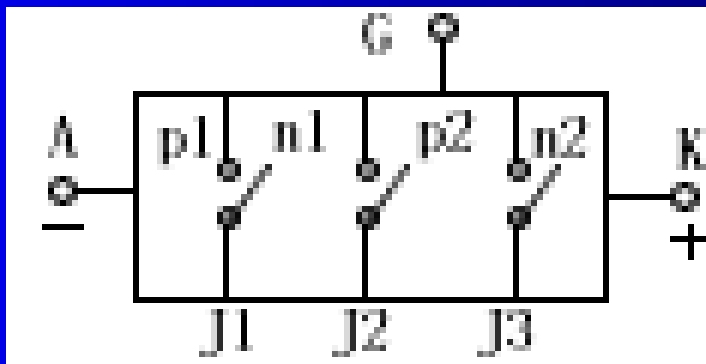
- 2. 可控硅的伏安特性
- 第 I 象限的是正向特性，第 III 象限的是反向特性。



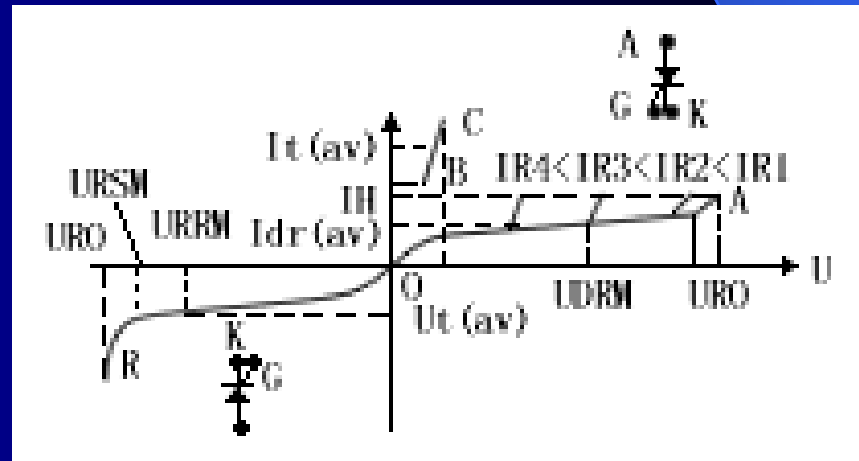
单向可控硅的基本特性

- **2. 可控硅的伏安特性**

- **2.1 反向特性:** 当控制极开路，阳极加上反向电压时，J2 结正偏，但 J1、J2 结反偏。此时只能流过很小的反向饱和电流，当电压进一步提高到 J1 结的雪崩击穿电压后，接着 J3 结也击穿，电流迅速增加，反向特性开始弯曲，如特性曲线的 OR 段所示，弯曲处的电压 U_{RO} 叫“反向转折电压”。此时，可控硅会发生永久性反向击穿。



阳极加反向电压

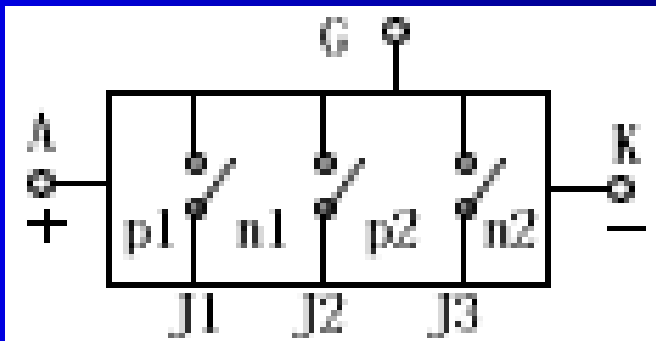


伏安特性

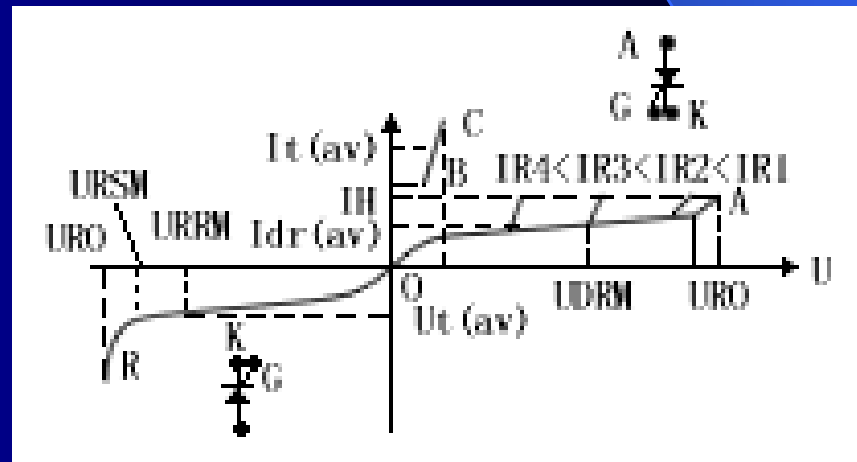
单向可控硅的基本特性

- **2. 可控硅的伏安特性**

- **2.2 正向特性：**当控制极开路，阳极加上正向电压时，J1、J3 结正偏，但 J2 结反偏，这与普通 PN 结的反向特性相似，也只能流过很小电流，这叫正向阻断状态，当电压增加，正向特性发生了弯曲，如特性 OA 段所示，弯曲处的是 U_{BO} 叫“正向转折电压”。



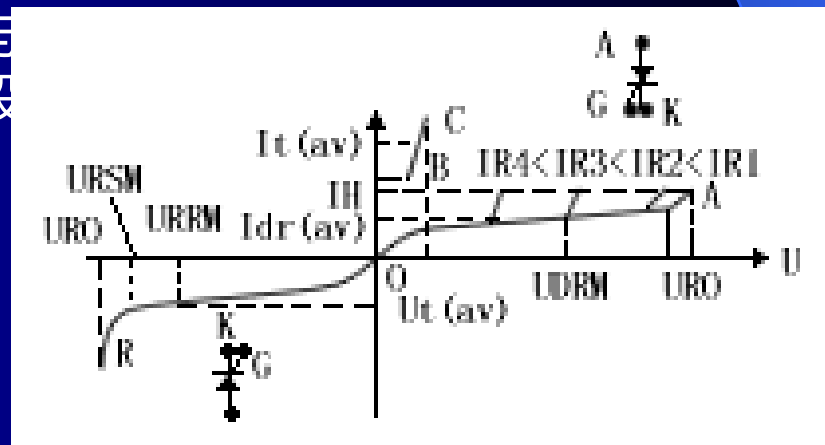
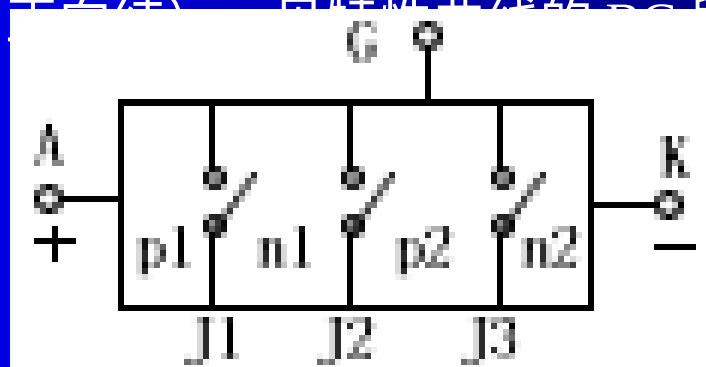
- 阳极加正向电压



- 伏安特性

单向可控硅的基本特性

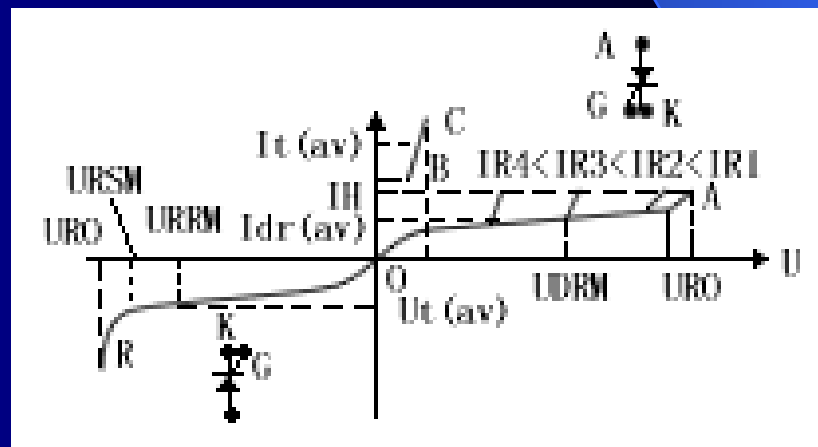
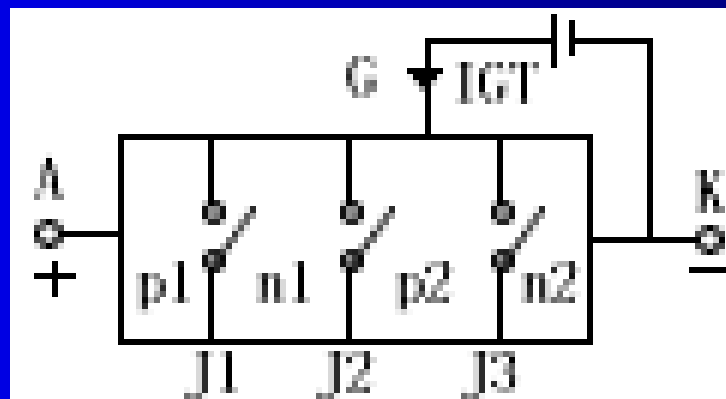
- 由于电压升高到 J2 结的雪崩击穿电压后，J2 结发生雪崩倍增效应，在结区产生大量的电子和空穴，电子时入 N1 区，空穴时入 P2 区。进入 N1 区的电子与由 P1 区通过 J1 结注入 N1 区的空穴复合，同样，进入 P2 区的空穴与由 N2 区通过 J3 结注入 P2 区的电子复合，因雪崩击穿，进入 N1 区的电子与进入 P2 区的空穴各自不能全部复合掉，这样，在 N1 区就有电子积累，在 P2 区就有空穴积累，结果使 P2 区的电位升高，N1 区的电位下降，J2 结变成正偏，只要电流稍增加，电压便迅速下降，出现所谓负阻特性，见特性曲线的虚线 AB 段。
- 这时 J1、J2、J3 三个结均处于正偏，可控硅便进入正向导电状态 --- 通态，此时，它的特性与二极管类似，见特性曲线的 BC 段。



单向可控硅的基本特性

- 2. 可控硅的伏安特性

- 2.3 触发导通特性：在控制极 G 上加入正向电压时因 J₃ 正偏，P₂ 区的空穴时入 N₂ 区，N₂ 区的电子进入 P₂ 区，形成触发电流 I_{GT} 。在可控硅的内部正反馈作用的基础上，加上 I_{GT} 的作用，使可控硅提前导通，导致伏安特性 OA 段左移， I_{GT} 越大，特性左移越快。



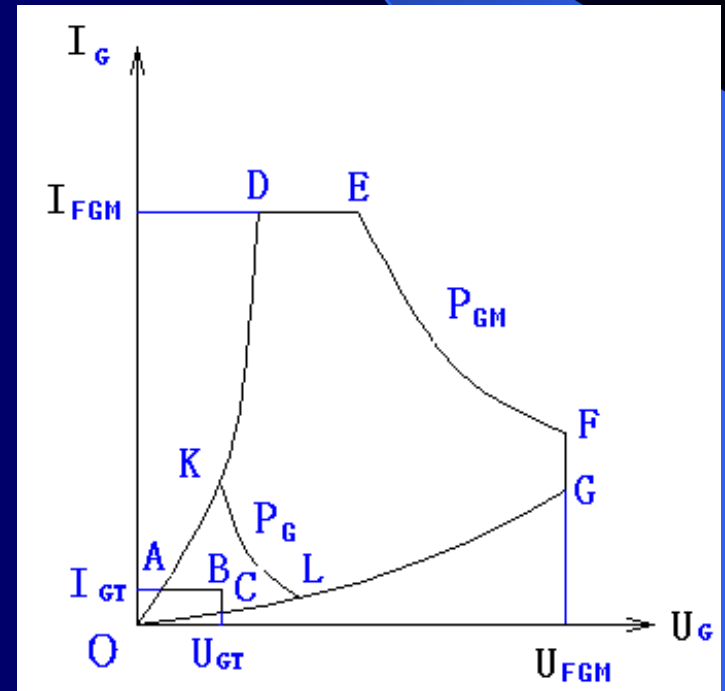
- 阳极和控制极均加正向电压

单向可控硅的基本特性

● 3. 可控硅的门极伏安特性

● 门极 G 与阴极 K 之间相当于一个二极管。

- 由于同一型号的 SCR 门极特性的分散性较大，所以常用低阻特性 OD 和高阻特性 OG 划定门极特性的上下边界。其实质上类同两个内阻不同的二极管正向特性曲线。
- 门极正向峰值电流界定 DE 边界；向峰值电压界定 FG 边界；功率 P_{GM} 界定 EFB 边界。
- ADEFGCBA 为可靠触发区，应根据电路的不同应用，正确选择合适的极触发电压和触发电路。
- 门极加上一定功率后，会引起门极发热，所以不宜过大地加入功率。时可以参考平均功率 P_G 曲线 KL。



单向可控硅的基本特性

● 3. 可控硅的门极伏安特性

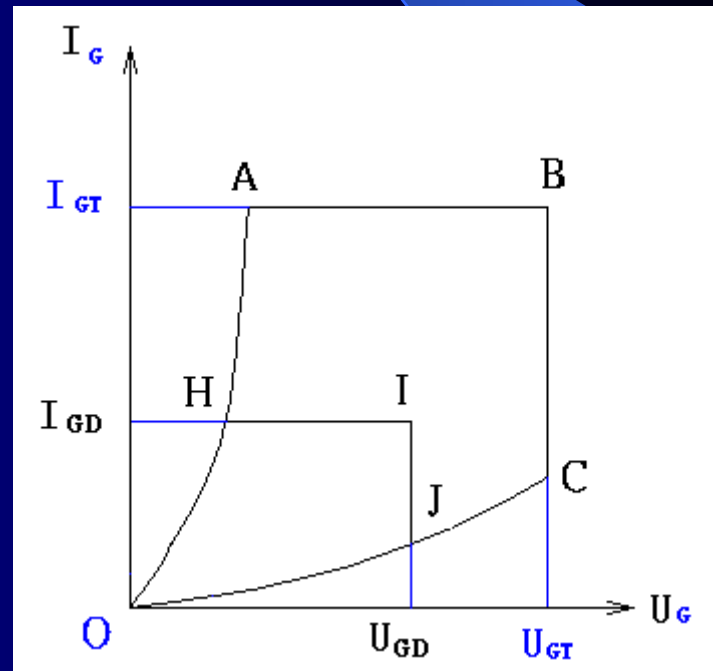
● 将原点附近的门极伏安特性，进行放大。

➤ 由不触发电流 I_{GD} 和不触发电压 U_{GD} 限定 OHIO 为不触发区，为了防止误触发，应使干扰信号的幅值限制为不能超过此区范围。一般 $U_{GD} = 0.2V$ 。

➤ U_{GT} 为门极触发电压， I_{GT} 为门极触发电流，HABCJIH 为不可靠触发区。

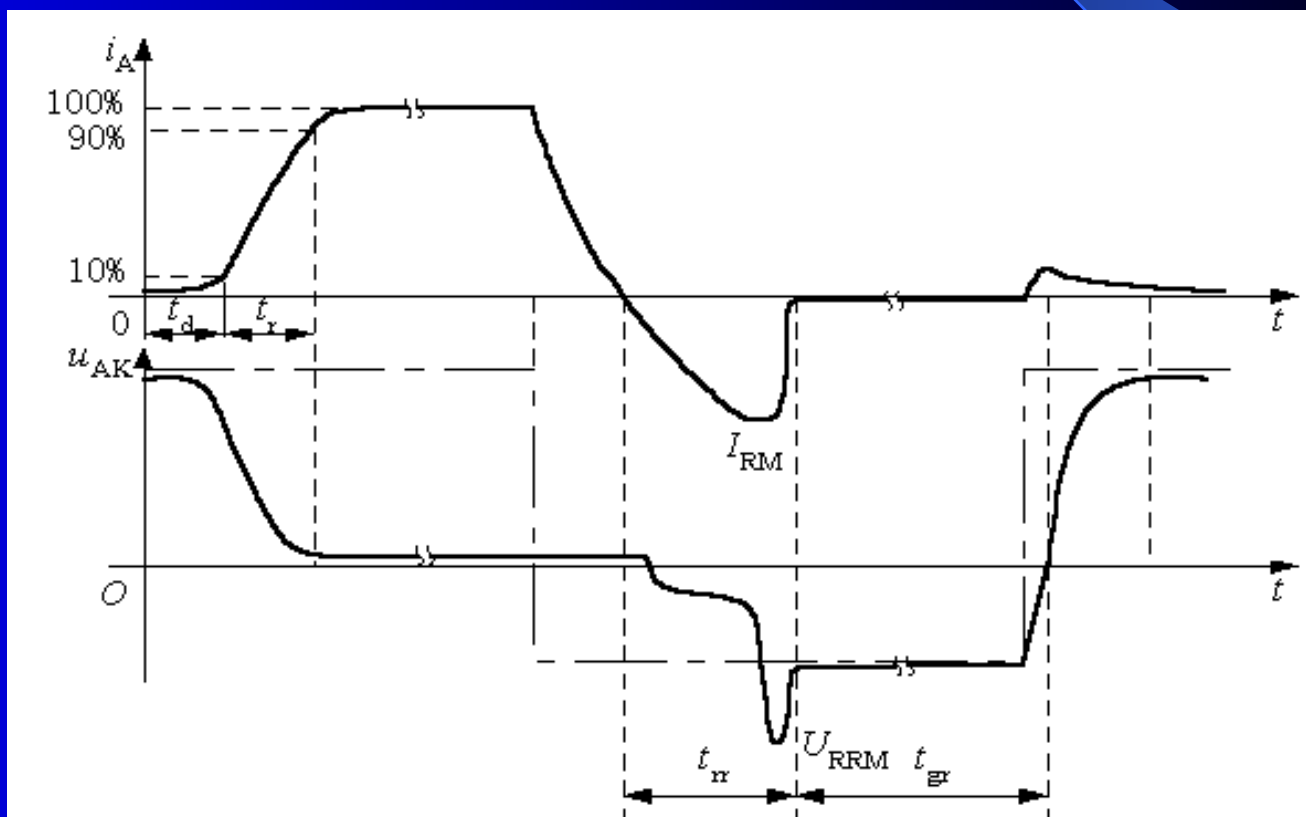
➤ 实际使用中，为了提高抗干扰能力，断时，在 GK 上加反向偏压，3V。

➤ 触发脉冲的幅值和前沿陡度影响的导通时间。越陡开通时间利于减小开通损耗。



单向可控硅的基本特性

- 4. 可控硅的动态特性
- 可控硅的开通和关断过程波形



单向可控硅的基本特性

- 4. 可控硅的动态特性

- 4.1 开通过程

- **延迟时间 t_d** ：门极电流阶跃时刻开始，到阳极电流上升到稳态值的 10% 的时间
- **上升时间 t_r** ：阳极电流从 10% 上升到稳态值的 90% 所需的时间
- **开通时间 t_{gt}** ： t_d 与 t_r 之和，即 $t_{gt} = t_d + t_r$

- 普通可控硅延迟时间为 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{s}$ ，上升时间为 $0.5 \sim 3 \mu\text{s}$ ，这是设计触发脉冲的依据。

单向可控硅的基本特性

● 4. 可控硅的动态特性

● 4.2 关断过程

- **反向阻断恢复时间 t_{rr}** ：正向电流降为零到反向恢复电流衰减至接近于零的时间。
- **正向阻断恢复时间 t_{gr}** ：可控硅要恢复其对正向电压的阻断能力还需要一段时间。

在正向阻断恢复时间内如果重新对可控硅施加正向电压，可控硅会重新正向导通。

实际应用中，应对可控硅施加足够长时间的反向电压，使可控硅充分恢复其对正向电压的阻断能力，电路才能可靠工作。

- **关断时间 t_q** ： t_{rr} 与 t_{gr} 之和，即 $t_q = t_{rr} + t_{gr}$
- 普通可控硅的关断时间约几百微秒。这是设计反向电压设计时间的依据。

单向可控硅主要特性参数

- 1、额定通态平均电流 (I_T (AV))
- 2、断态重复峰值电压 (V_{DRM})
- 3、反向重复峰值电压 (V_{RRM})
- 4、断态重复平均电流 (I_{DR} (AV))
- 5、反向重复平均电流 (I_{RR} (AV))
- 6、通态平均电压 (V_{TM} (AV))
- 7、门极触发电流 (I_{GT})
- 8、门极触发电压 (V_{GT})
- 9、断态电压临界上升率 (du/dt)
- 10、维持电流 (I_H)
- 11、擎住电流 (I_L)
- 12、浪涌电流 (I_{TSM})
- 13、额定结温 (T_{jM})

单向可控硅主要特性参数

- **(1) 断态重复峰值电压 V_{DRM}** ：指在门极开路而器件的结温为额定值时，允许重复加在器件上的正向峰值电压。若加在管子上的电压大于 U_{DRM} ，管子可能会失控而自行导通。
- **(2) 反向重复峰值电压 V_{RRM}** ：指门极开路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的反向峰值电压。当加在管子上反向电压大于 V_{RRM} 时，管子可能会被击穿而损坏。
- 通常把 V_{DRM} 和 V_{RRM} 中较小的那个数值标作可控硅型号上的额定电压。在选用管子时，额定电压应为正常工作峰值电压的 2 ~ 3 倍，以保证电路的工作安全。
- **(3) 通态平均电压 V_{TM}** ：指在规定的工作温度条件下，使可控硅导通的正弦波半个周期内 U_{AK} 的平均值，一般在 0.4 ~ 1.2V。

单向可控硅主要特性参数

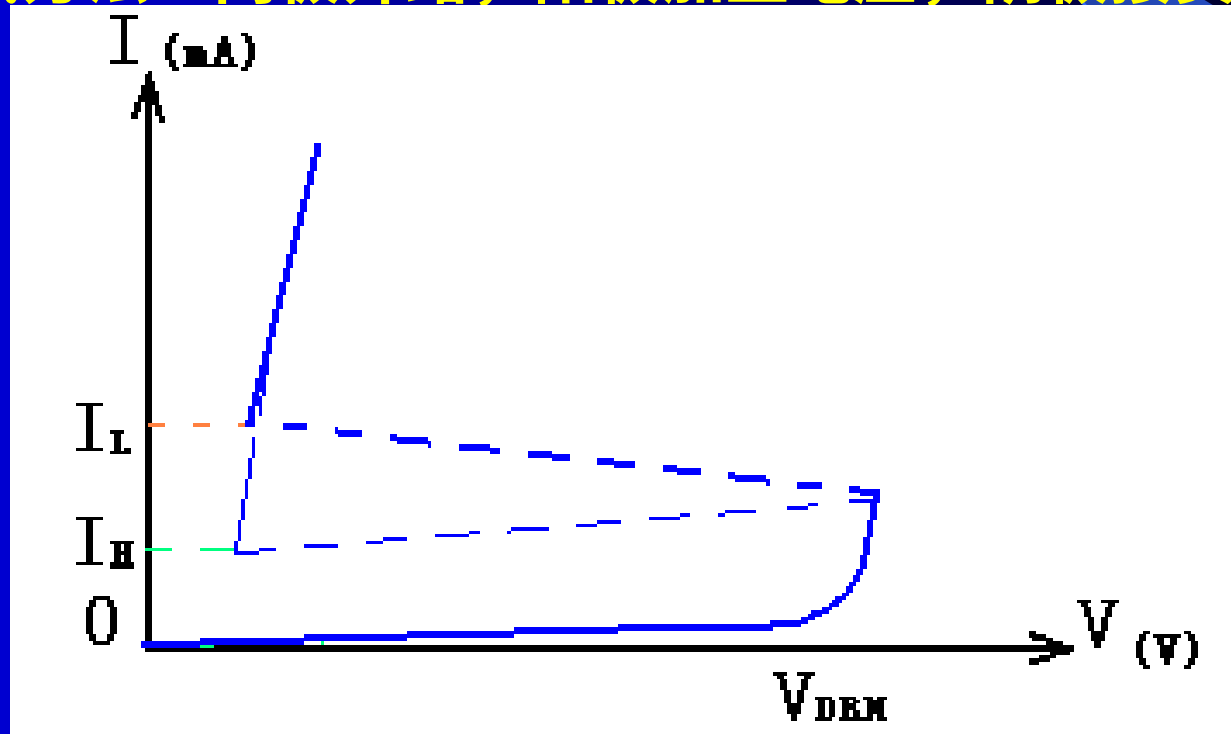
- **(4) 额定通态平均电流 I_T** ：其定义和二极管的额定整流电流意义相同。要注意的是若可控硅的导通时间远小于正弦波的半个周期，即使 I_T 值没超过额定值，但峰值电流将非常大，以致可能超过管子所能提供的极限。
- **(5) 维持电流 I_H** ：指在常温门极开路时，可控硅从较大的通态电流降到刚好能保持通态所需要的最小通态电流。一般 I_H 值从几十到几百毫安，视可控硅电流容量大小而定。
- **(6) 擎住电流 I_L** ：晶闸管刚从断态转入通态并移除触发信号后，能维持导通所需的最小电流。
- 对同一晶闸管来说，通常 I_L 约为 I_H 的 2~4 倍。
- **(7) 浪涌电流 I_{TSM}** ：指由于电路异常情况引起的并使结温超过额定结温的不重复性最大正向过载电流。

单向可控硅主要特性参数

- **(8) 门极触发电流 I_{GT}** ：在常温下，阳极电压为 6V 时，使可控硅能完全导通所需的门极电流，一般为毫安级。
- **(9) 门极触发电压 V_{GT}** ：产生门极触发电流所必须的最小门极电压，一般为 5V 左右。
- **(10) 断态电压临界上升率 du/dt** ：在额定结温和门极开路的情况下，不导致可控硅从断态到通态转换的最大正向电压上升率。一般为每微秒几十伏。
- **(11) 通态电流临界上升率 di/dt** ：在规定条件下，可控硅能承受的最大通态电流上升率。若可控硅导通电流上升太快，则会在可控硅刚开通时，有很大的电流集中在门极附近的小区域内，从而造成局部过热而损坏可控硅。

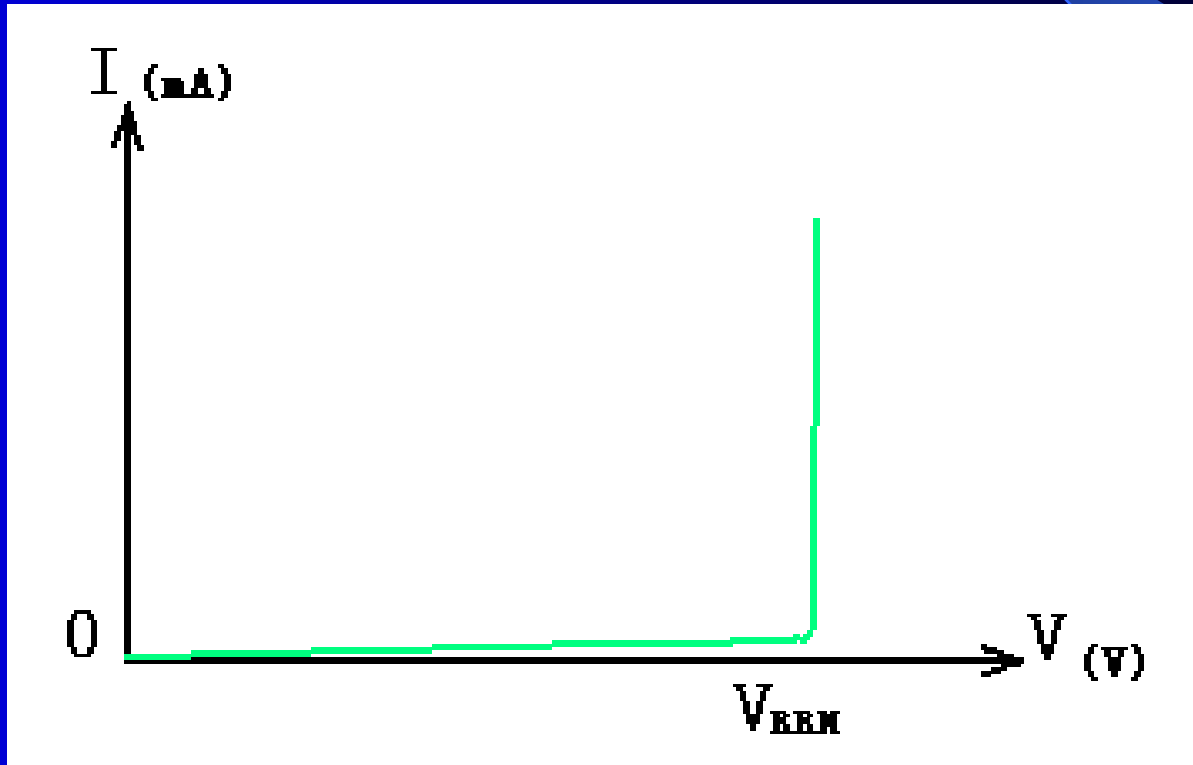
单向可控硅主要参数测试曲线

- (1) 断态重复峰值电压 V_{DRM}
- (2) 维持电流 I_H 、 (3) 擎住电流 I_L
- 测试方法：门极开路，阳极加正电压，阴极接负电压



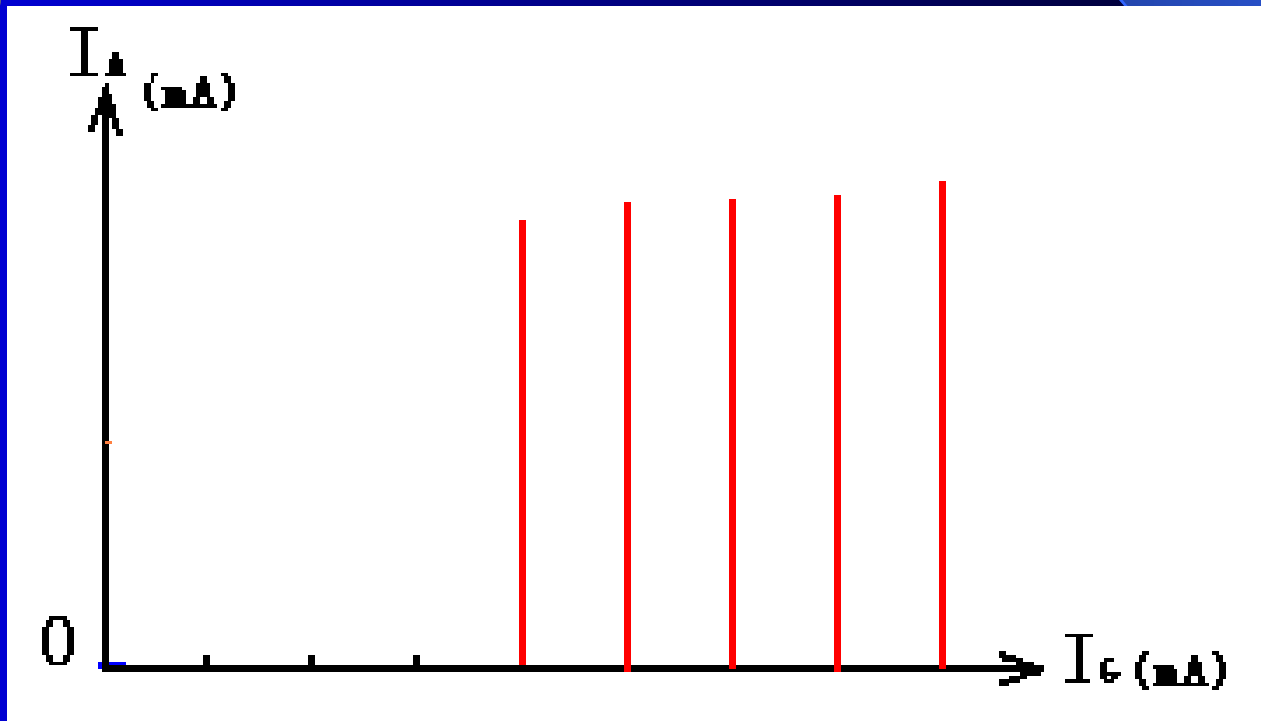
单向可控硅主要参数测试曲线

- (4) 反向重复峰值电压 V_{RRM}
- 测试方法：门极开路，阳极接负电压，阴极加正电压



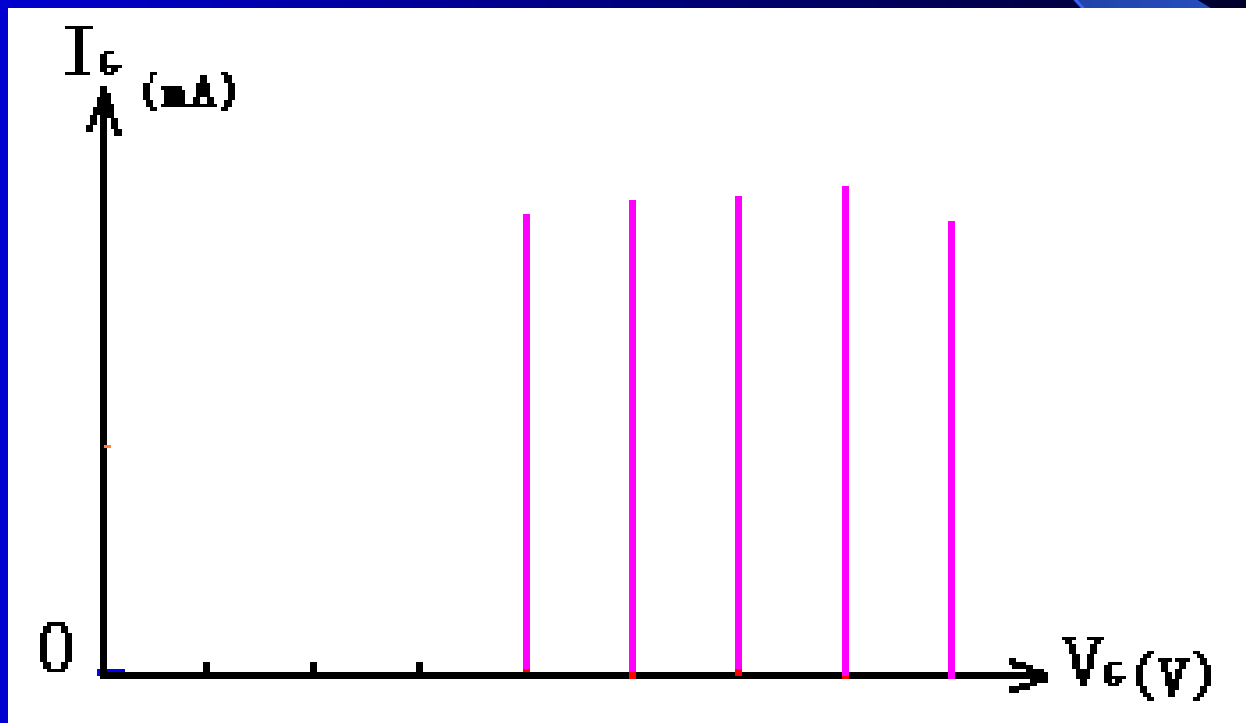
单向可控硅主要参数测试曲线

- (5) 门极触发电流 I_{GT}
- 测试方法：X轴接阶梯信号，加正向电压使可控硅产生阳极电流的第一根触发电流值（第几点与阶梯信号电流的积）



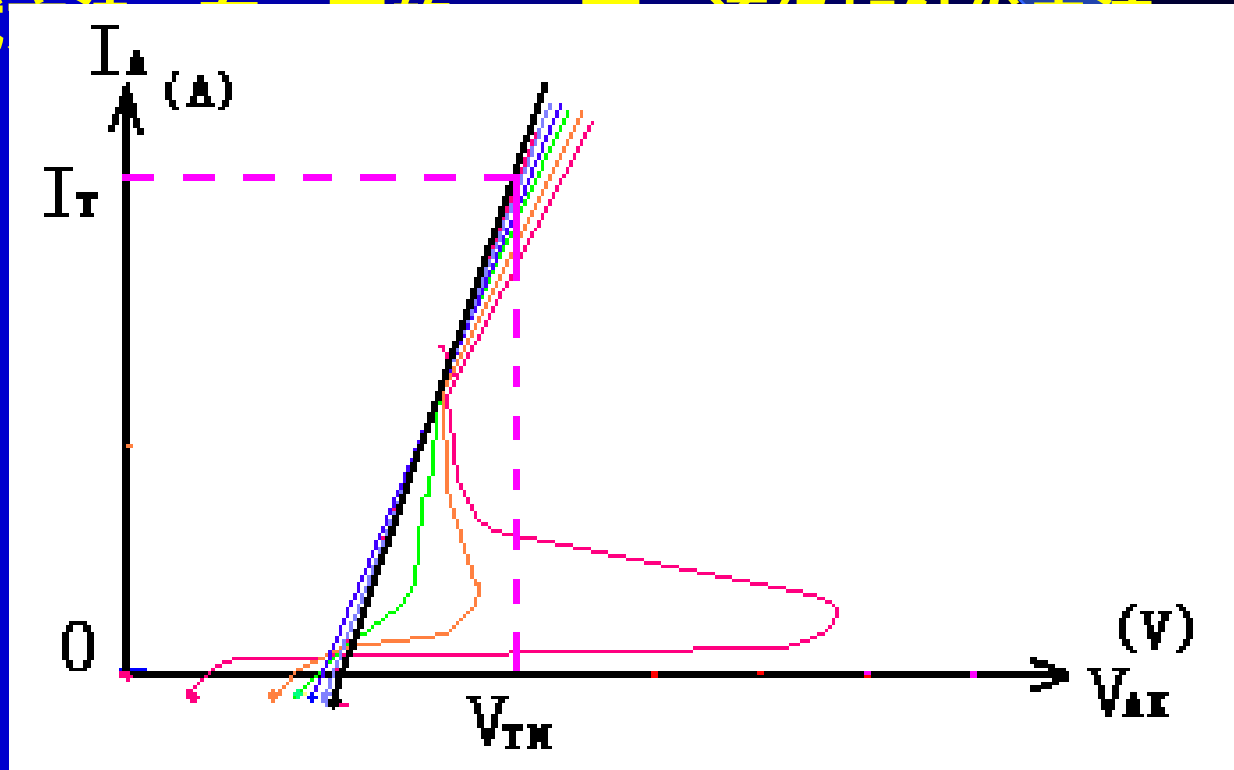
单向可控硅主要参数测试曲线

- (6) 门极触发电流 I_{GT}
- 测试方法：X轴接阶梯信号，加正向电压使可控硅产生触发电流的第一根触发电压值（第几点与阶梯信号电压的积）



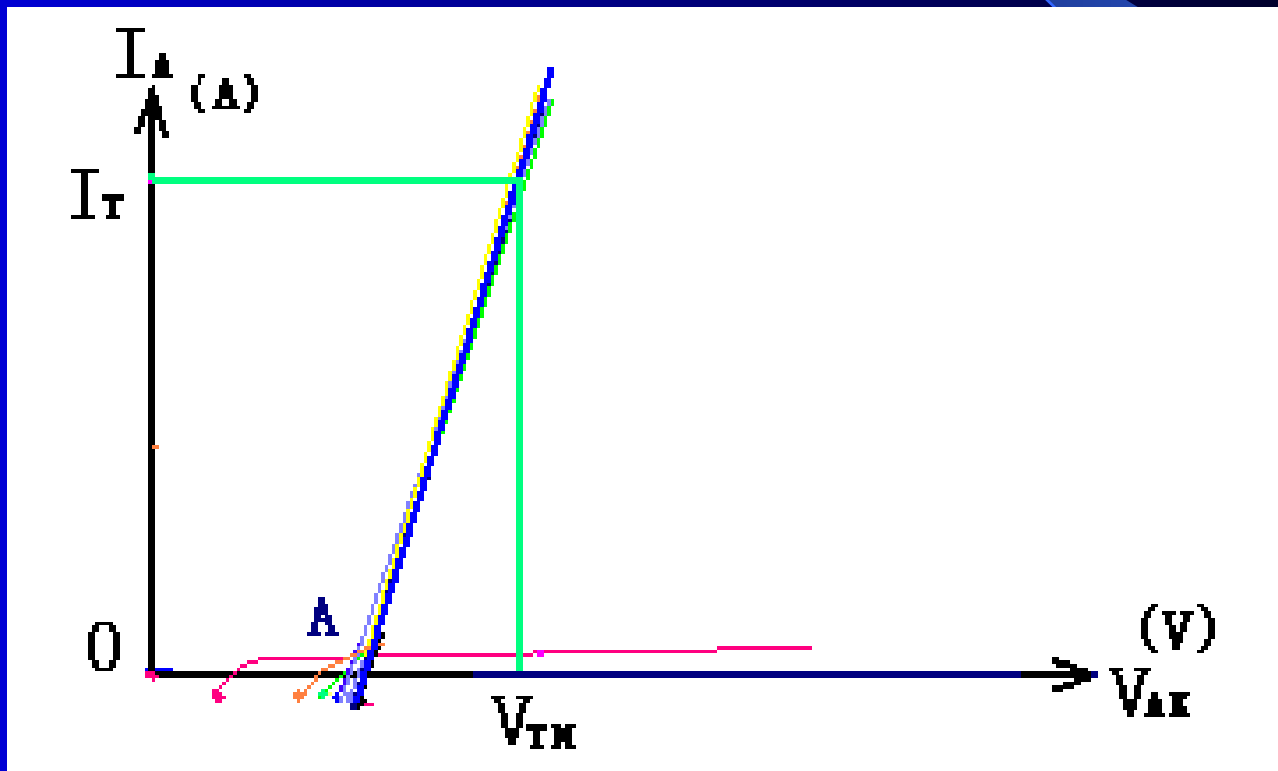
单向可控硅主要参数测试曲线

- (7) 通态平均电压 V_{TM} (刚触发导通时的 V_T
 M)
- 测试方法: 在额定电流 I_T 下进行触发电压 V_{TM}



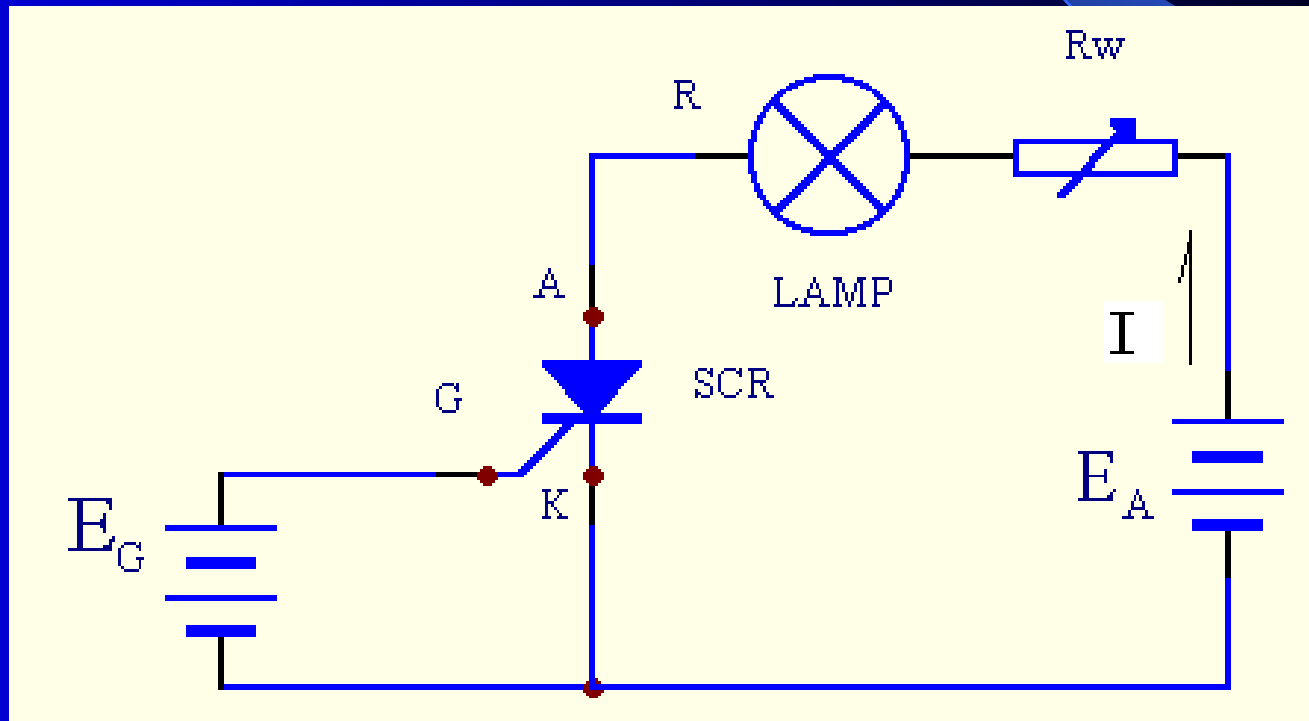
单向可控硅主要参数测试曲线

- (7) 通态平均电压 V_{TM} (完全导通时的 V_{TM})
- 测试方法: 在一定的 I_T 与 I_G 下, 可控硅上的正向压降。



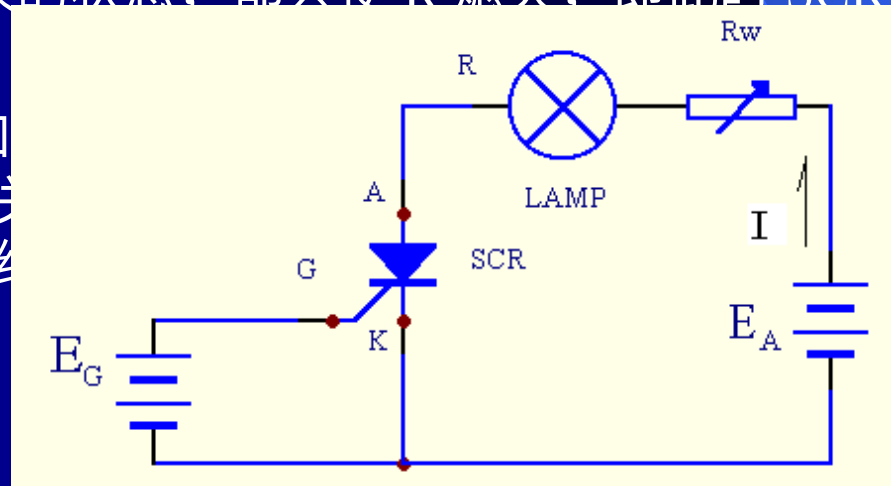
可控硅的开关特点

- 晶闸管 SCR 相当于一个半可控的、可开不可关的单向开关。



可控硅的开关特点

- 当 SCR 的阳极和阴极电压 $U_{AK} < 0$ ，即 E_A 下正上负，无论门极 G 加什么电压，SCR 始终处于关断状态；
- $U_{AK} > 0$ 时，只有 $E_{Gk} > 0$ ，SCR 才能导通。说明 SCR 具有正向阻断能力；
- SCR 一旦导通，门极 G 将失去控制作用，即无论 E_G 如何，均保持导通状态。SCR 导通后的管压降为 $1V$ 左右，主电路中的电流 I 由 R 和 R_w 以及 E_A 的大小决定；
- 当 $U_{AK} < 0$ 时，无论 SCR 原来的状态，都会使 R 熄灭，即此时 SCR 关断。其实，在 I 逐渐降低刚刚能够维持 SCR 导通。如继续降低 I ，则 SCR 同样会关断。该小电流称为 SCR 的维持电流。

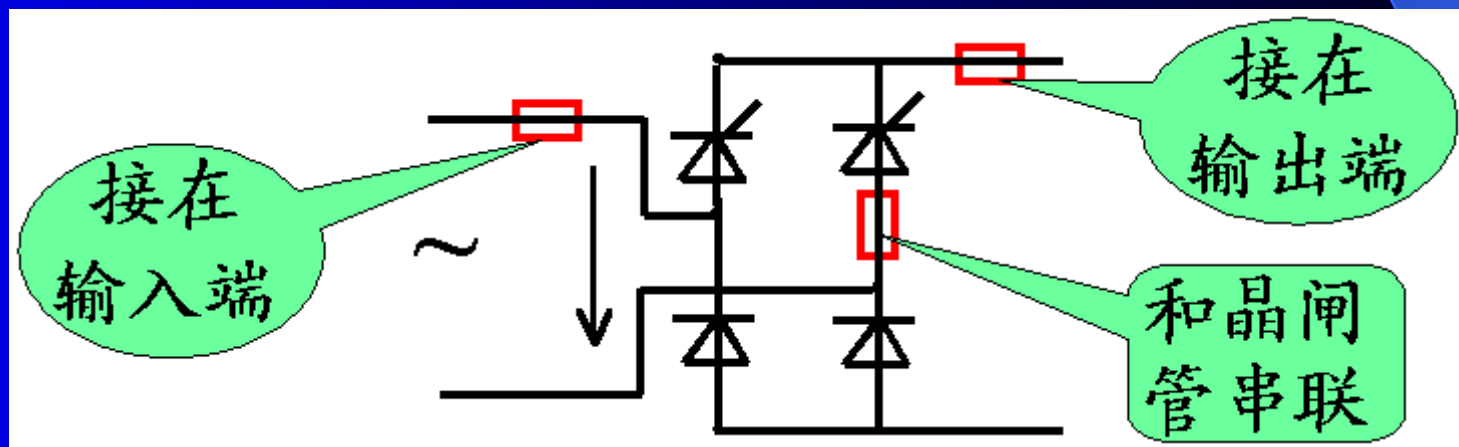


可控硅的选用

- **（1）晶闸管额定电压的选择：**可控硅实际工作时承受的正常峰值电压应低于正、反向重复峰值电压 V_{DRM} 和 V_{RRM} ，并留有 2 ~ 3 倍的额定电压值的余量，还应有可靠的过电压保护措施。
- **（2）晶闸管额定电流的选择：**可控硅实际工作通过的最大平均电流应低于额定通态平均电流 I_T ，并根据电流波形的变化进行相应换算，还应有 1.5 ~ 2 倍的余量及过电流保护措施。
- **（3）关于门极触发电压和电流的考虑：**可控硅实际触发电压和电流应大于可控硅参数 V_{GT} 和 I_{GT} ，以保证可控硅可靠地被触发，但也不能超过允许的极限值。

可控硅的保护措施

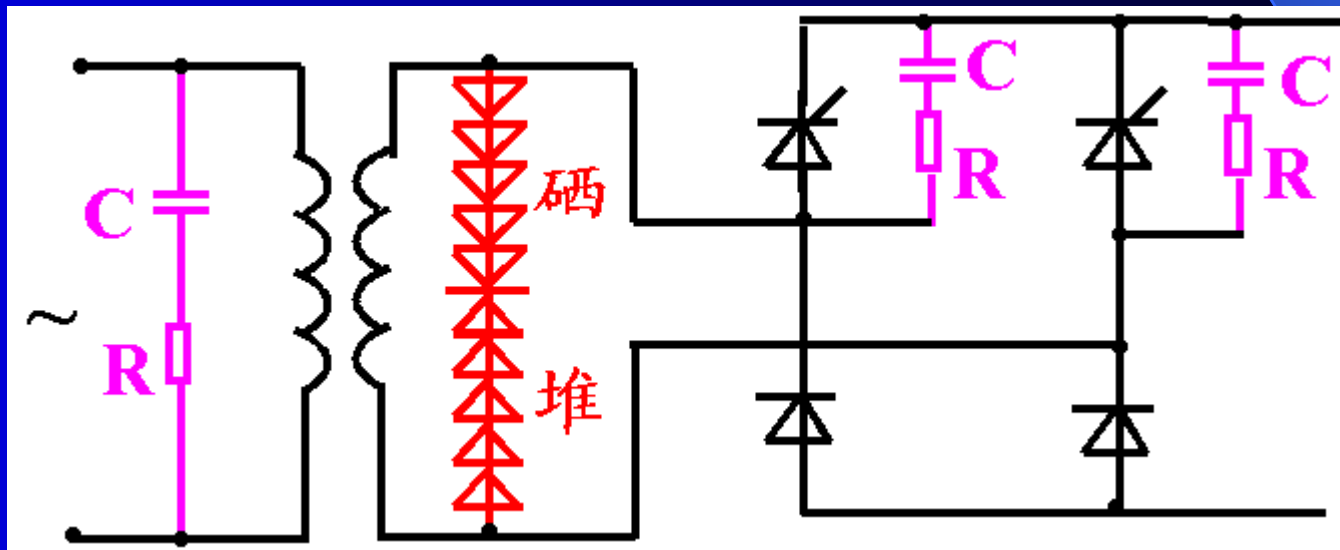
- 1) 过流保护
- 快速熔断器：电路中加快速熔断器；
- 过流继电器：在输出端装直流过电流继电器；
- 过流截止电路：利用电流反馈减小晶闸管的导通角或停止触发，从而切断过流电路。



可控硅的保护措施

● 2) 过压保护

- **阻容吸收**利用电容吸收过压。即将过电压的能量变成电场能量储存在电容中，然后由电阻消耗掉。
- **硒整流堆**硒堆为非线性元件，过压后迅速击穿，其电阻减小，抑制过压冲击。



可控硅的几种导通方式

- 正常触发导通： $U_{AK} > 0$ ，同时 $U_{GK} > 0$ ；
- 阳极电压作用：当 U_{AK} 升至某个大数值，使 T1 的漏电流由于雪崩效应而加大，同时由于正反馈而使漏电流放大，最终使 SCR 饱和导通；
- dU/dt 作用：如果 U_{AK} 以高速率上升，则在中间结电容上产生的电流可以引起导通；
- 温度作用：温度上升，T1, T2 的漏电流加大，引起 SCR 导通；
- 光触发：当强光直接照射在硅片上，产生电子空穴对，在电场的作用，产生触发 SCR 的电流。目前，有一些场合使用这种方式来触发 SCR，如高压直流输电（HVDC）。这种 SCR 称为光控晶闸管（Light Triggered Thyristor —— LTT）。

双向晶闸管

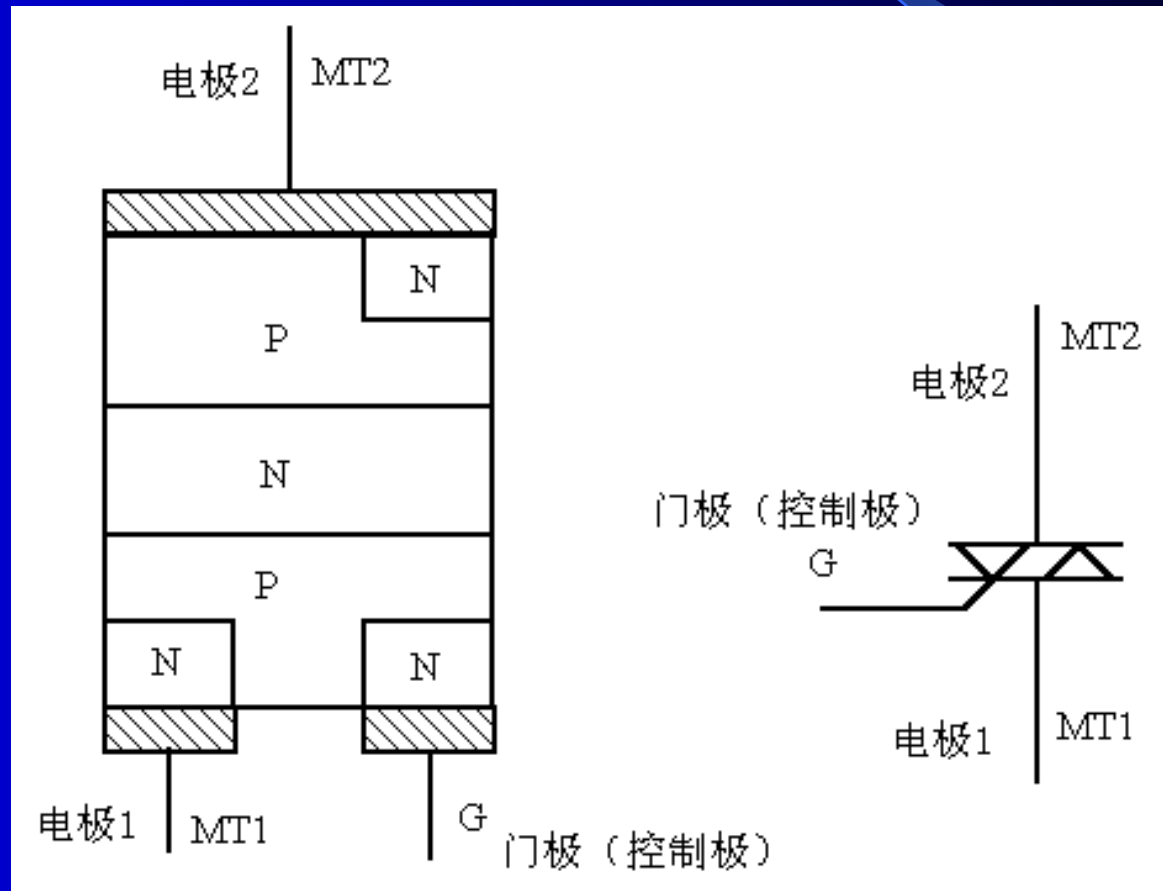
- **双向晶闸管**（Triode AC Switch——TRIAC 或 Bidirectional triode thyristor）
 - 双向可控硅可以被认为是一对反并联连接的单向普通可控硅，有两个主电极 T_1 和 T_2 ，一个门极 G 。
 - 正反两方向均可触发导通，所以双向可控硅在第 I 和第 III 象限有对称的伏安特性。
 - 与一对反并联可控硅相比是经济的，且控制电路简单，在交流调压电路、固态继电器（Solid State Relay——SSR）和交流电机调速等领域应用较多。
 - 通常用在交流电路中，因此不用平均值而用有效值来表示其额定电流值。

双向晶闸管

- **双向晶闸管**（Triode AC Switch——TRIAC 或 Bidirectional triode thyristor）
 - 双向可控硅可以被认为是一对反并联连接的单向普通可控硅。
 - 双向可控硅和单向可控硅的区别是：
 - 第一，双向可控硅在触发之后是双向导通的； $\pm U_{AK}$
 - 第二，在门极中所加的触发信号不管是正的还是负的都可以使双向可控硅导通。 $\pm U_{GK}$

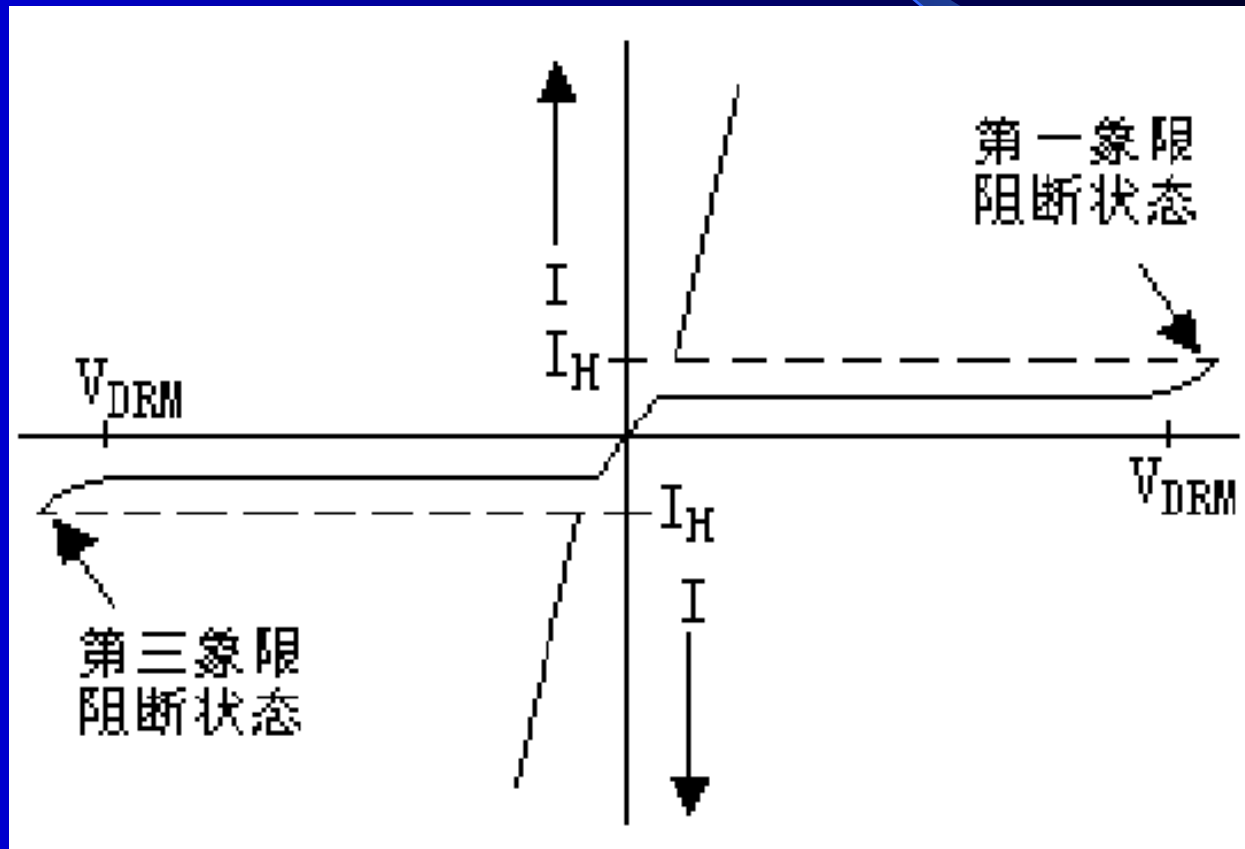
双向晶闸管

- 双向可控硅的结构示意图和符号图



双向晶闸管

- 双向可控硅的伏安特性



双向晶闸管

- **双向可控硅的触发**
- **(1) 第一象限触发** $MT2+$ 、 $G+$ ：即相对于电极 M T1、MT2 的电压为正；门极 G 的触发电流为正。
- **(2) 第二象限触发** $MT2+$ 、 $G-$ ：即相对于电极 M T1、MT2 的电压为正；门极 G 的触发电流为负。
- **(3) 第三象限触发** $MT2-$ 、 $G-$ ：即相对于电极 MT 1、MT2 的电压为负；门极 G 的触发电流为负。
- **(4) 第四象限触发** $MT2-$ 、 $G+$ ：即相对于电极 M T1、MT2 的电压为负；门极 G 的触发电流为正。
- 双向可控硅的最高触发灵敏度在**第一、三象限**，而在第二、四象限比较差。故在实际应用中常采用第一、第三象限触发方式。

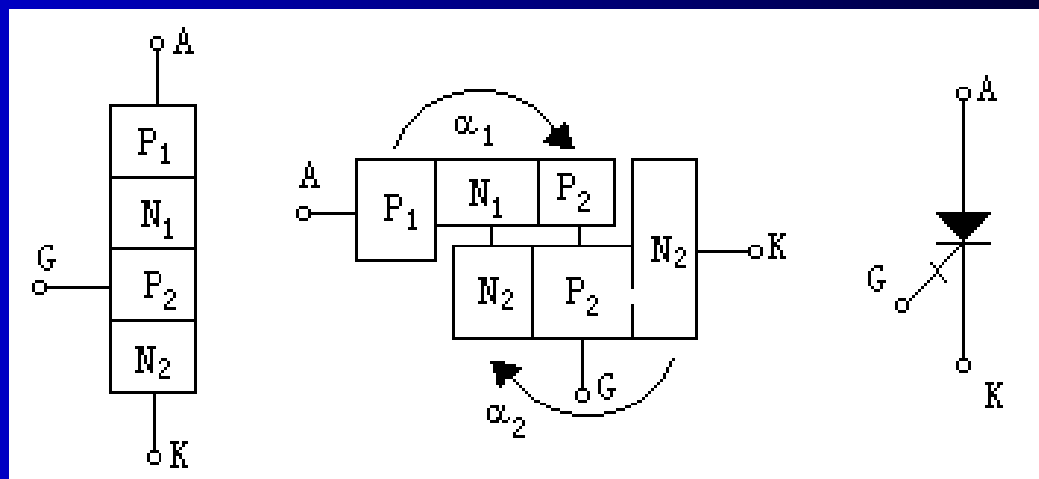
可关断晶闸管 GTO

- **门极可关断晶闸管**（**G**ate-**T**urn-**O**ff Thyristor — **GTO**）
 - 可以通过在门极施加负的脉冲电流使其关断；
 - GTO 的电压、电流容量较大，与普通晶闸管接近，因而在兆瓦级以上的大功率场合仍有较多的应用。

可关断晶闸管 GTO

门极可关断晶闸管的结构

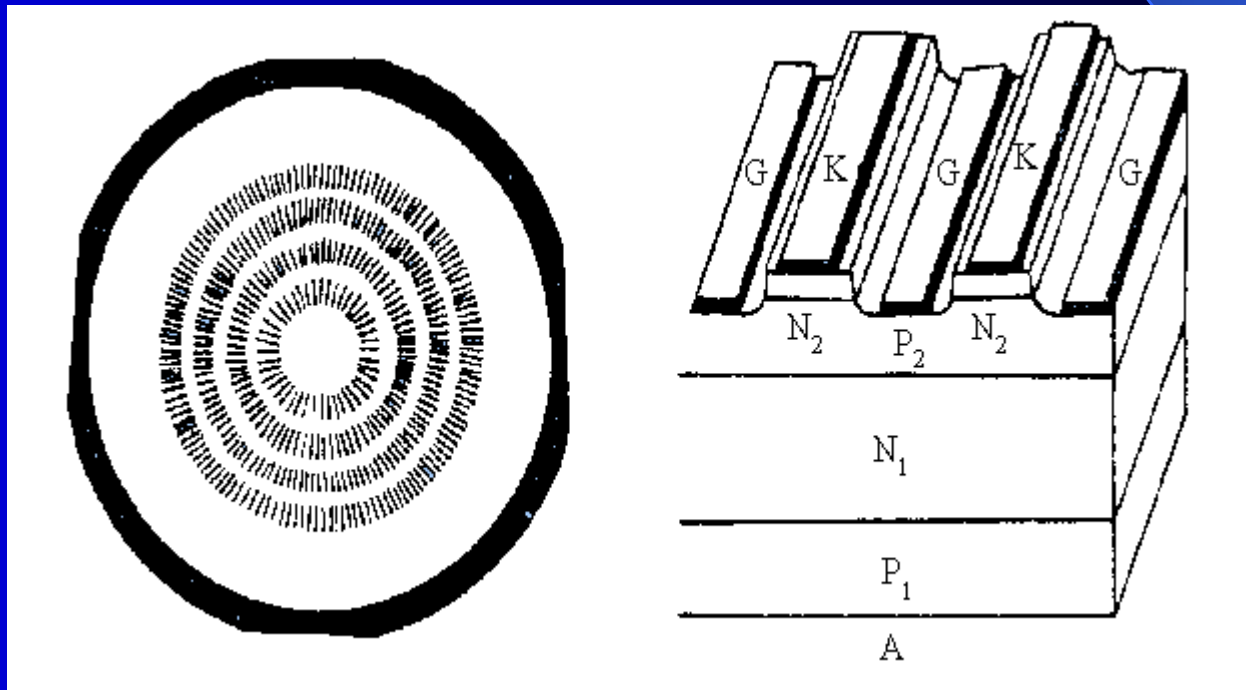
- 与普通可控硅的相同点：PNPN 四层半导体结构，外部引出阳极、阴极和门极；
- 和普通可控硅的不同：GTO 是一种多元的功率集成器件，内部包含数十个甚至数百个共阳极的小 GTO 元，这些 GTO 元的阴极和门极则在器件内部并联在一起。



GTO 的结构与符号

可关断晶闸管 GTO

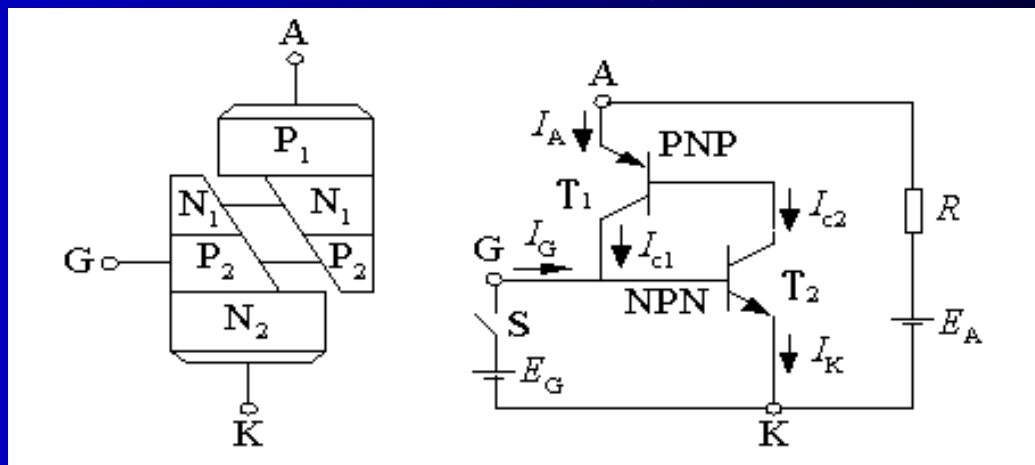
- 门极可关断晶闸管的内部结构
- 1) 各单元的阴极、门极间隔排列的图形
- 2) 并联单元结构断面示意图



可关断晶闸管 GTO

● 门极可关断晶闸管的工作原理

- 与普通晶闸管一样，可以用如图所示的双晶体管模型来分析。
- $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 是器件临界导通的条件。当 $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$ 时，两个等效晶体管过饱和而使器件导通；当 $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ 时，不能维持饱和导通而关断。



可关断晶闸管 GTO

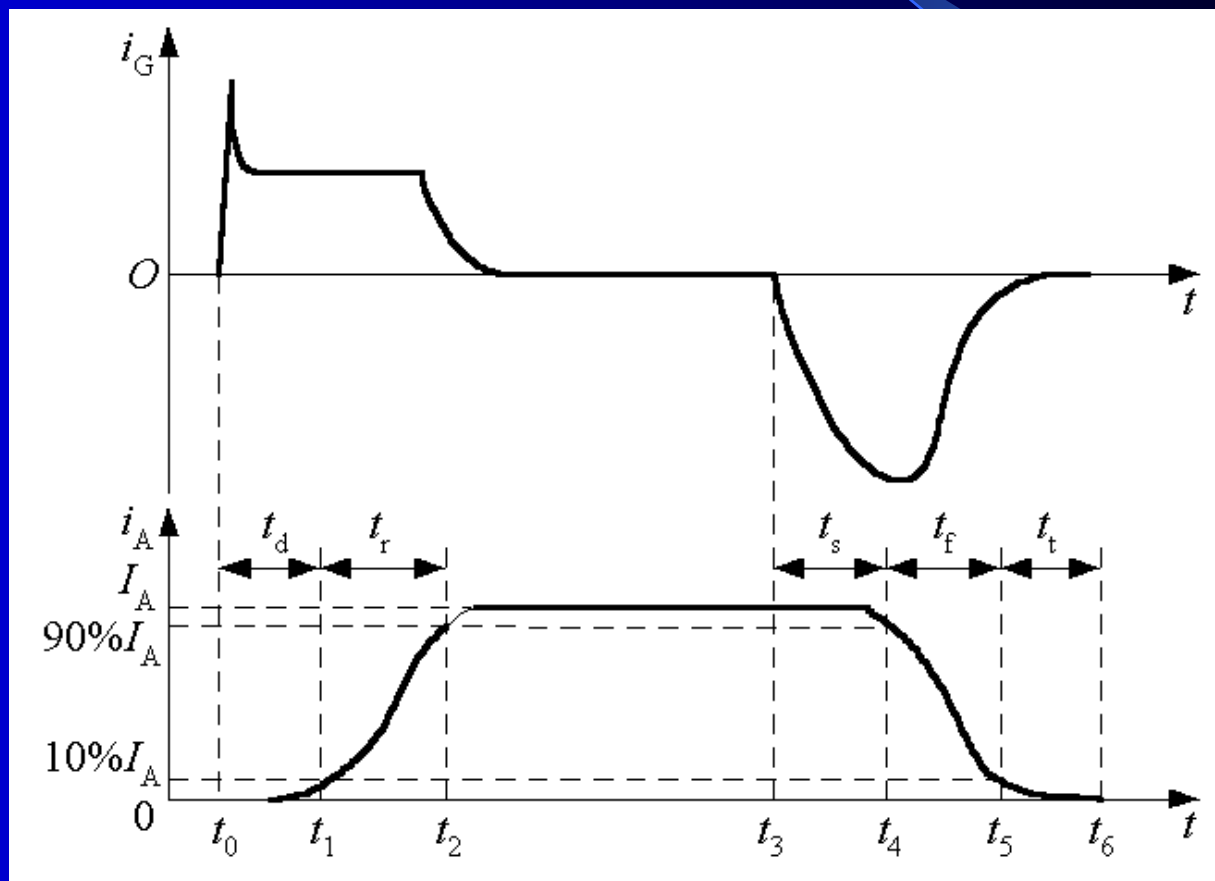
- **门极可关断晶闸管的工作原理**
- GTO 能够通过门极关断的原因是其与普通可控硅有如下区别：
 - (1) 设计 α_2 较大，使晶体管 T_2 控制灵敏，易于 GTO 关断；
 - (2) 导通时过程与普通可控硅一样，只是 $\alpha_1 + \alpha_2$ 更接近 1 (≈ 1.05 ，普通可控硅 $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1.15$)，这样导通时饱和不深，接近临界饱和，有利门极控制关断，但导通时管压降增大；
 - (3) 多元集成结构使 GTO 元阴极面积很小，门、阴极间距大为缩短，使得 P_2 基区横向电阻很小，能从门极抽出较大电流。
 - (4) 关断过程：强烈正反馈——门极加负脉冲即从门极抽出电流，则 I_{b2} 减小，使 I_K 和 I_{c2} 减小， I_{c2} 的减小又使 I_A 和 I_{c1} 减小，又进一步减小 V_2 的基极电流；
 - (5) 当 I_A 和 I_K 的减小使 $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ 时，器件退出饱和而关断；
 - (6) 多元集成结构还使 GTO 比普通可控硅开通过程快，承受 di/dt 能力强。

可关断晶闸管 GTO

- **门极可关断晶闸管的主要参数**
- 许多参数和普通晶闸管相应的参数意义相同，以下只介绍意义不同的参数：
- **1) 开通时间 t_{on} ：** 延迟时间与上升时间之和。延迟时间一般约 $1\sim 2\mu\text{s}$ ，上升时间则随通态阳极电流值的增大而增大；
- **2) 关断时间 t_{off} ：** 一般指储存时间和下降时间之和，不包括尾部时间。GTO 的储存时间随阳极电流的增大而增大，下降时间一般小于 $2\mu\text{s}$ ；
- 不少 GTO 都制造成逆导型，类似于逆导晶闸管，需承受反压时，应和电力二极管串联。

可关断晶闸管 GTO

- 可关断可控硅的开通和关断过程波形



可关断晶闸管 GTO

- 门极可关断晶闸管的主要参数
- 3) 最大可关断阳极电流 I_{ATO} : 用来标称 GTO 的额定电流;
- 4) 电流关断增益 β_{off} : 最大可关断阳极电流 I_{ATO} 与门极负脉冲电流最大值 I_{GM} 之比称为电流关断增益

$$\beta_{off} = I_{ATO} / I_{GM}$$

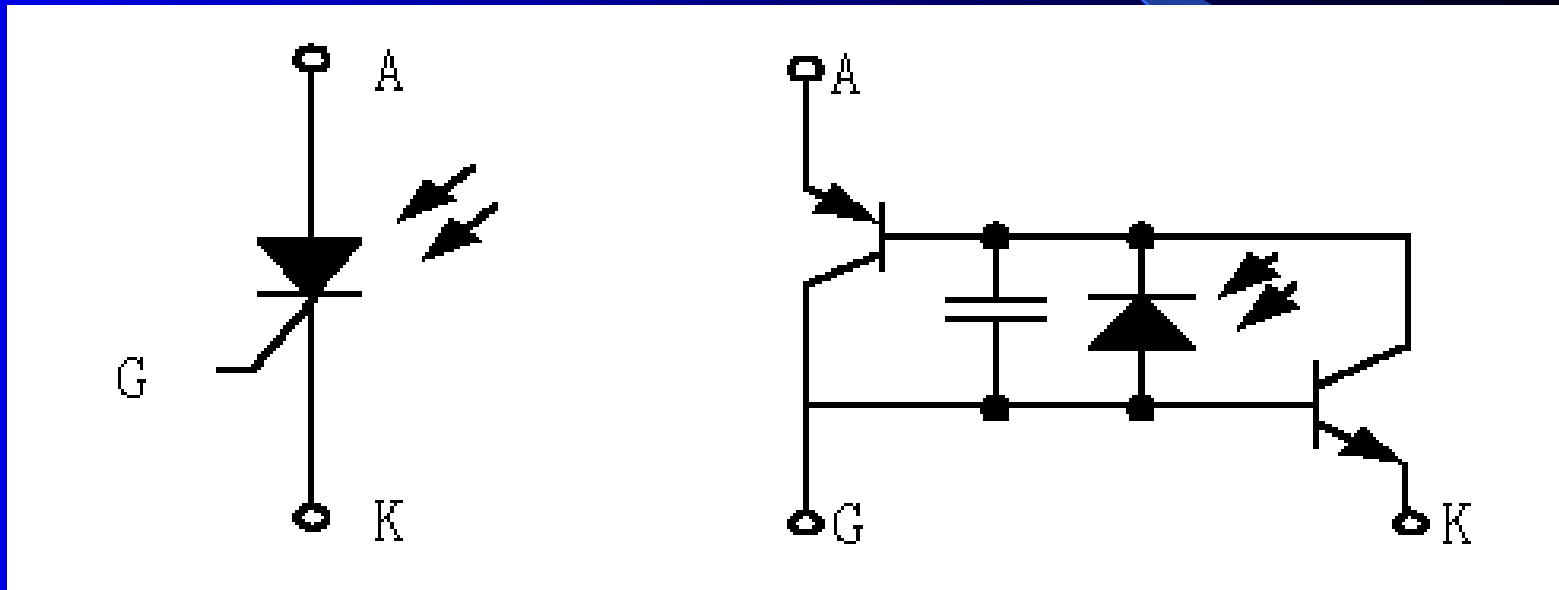
β_{off} 一般很小, 只有 5 左右, 这是 GTO 的一个主要缺点。
1000A 的 GTO 关断时门极负脉冲电流峰值要 200A 。

光控晶闸管 LTT

- **光控可控硅**（ Light Triggered Thyristor—LTT ）
- LTT 又称光触发可控硅，是利用一定波长的光照信号触发导通的可控硅；
 - 小功率光控可控硅只有阳极和阴极两个端子；
 - 大功率光控可控硅则还带有光缆，光缆上装有作为触发光源的发光二极管或半导体激光器；
 - 光触发保证了主电路与控制电路之间的绝缘，且可避免电磁干扰的影响，因此目前在高压大功率的场合，如高压直流输电和高压核聚变装置中，占据重要的地位。

光控晶闸管 LTT

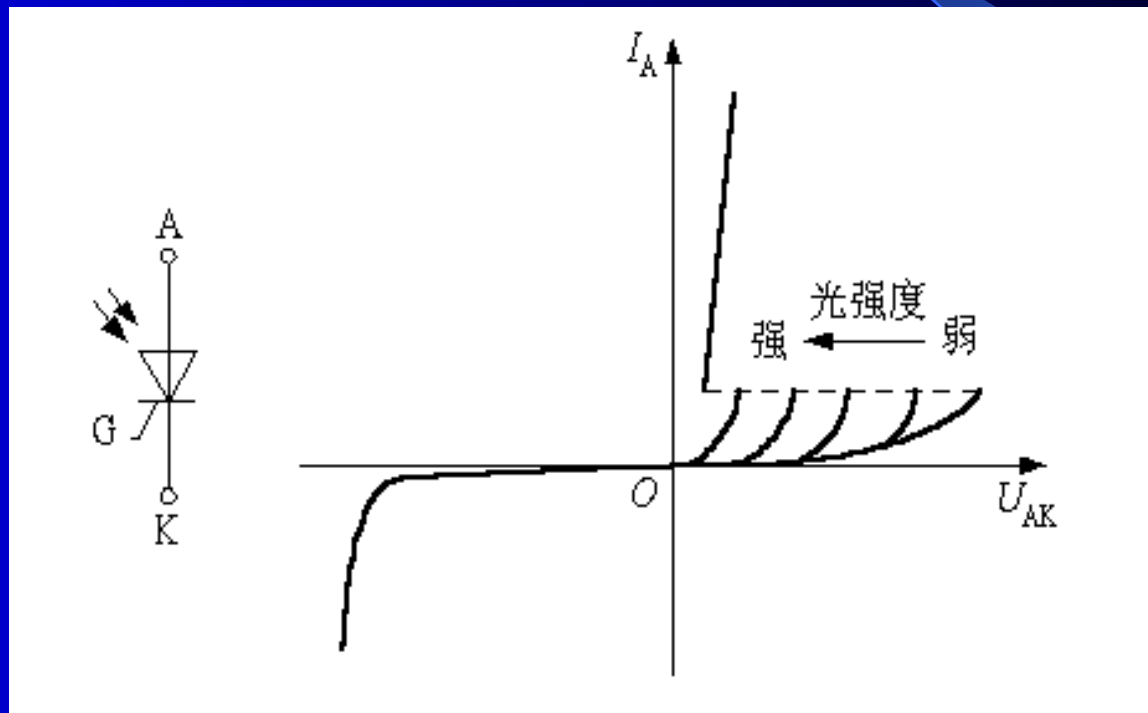
- 光控可控硅 (Light Triggered Thyristor—LTT)



- 光控可控硅的符号及等效电路

光控晶闸管 LTT

- 光控可控硅 (Light Triggered Thyristor—LTT)



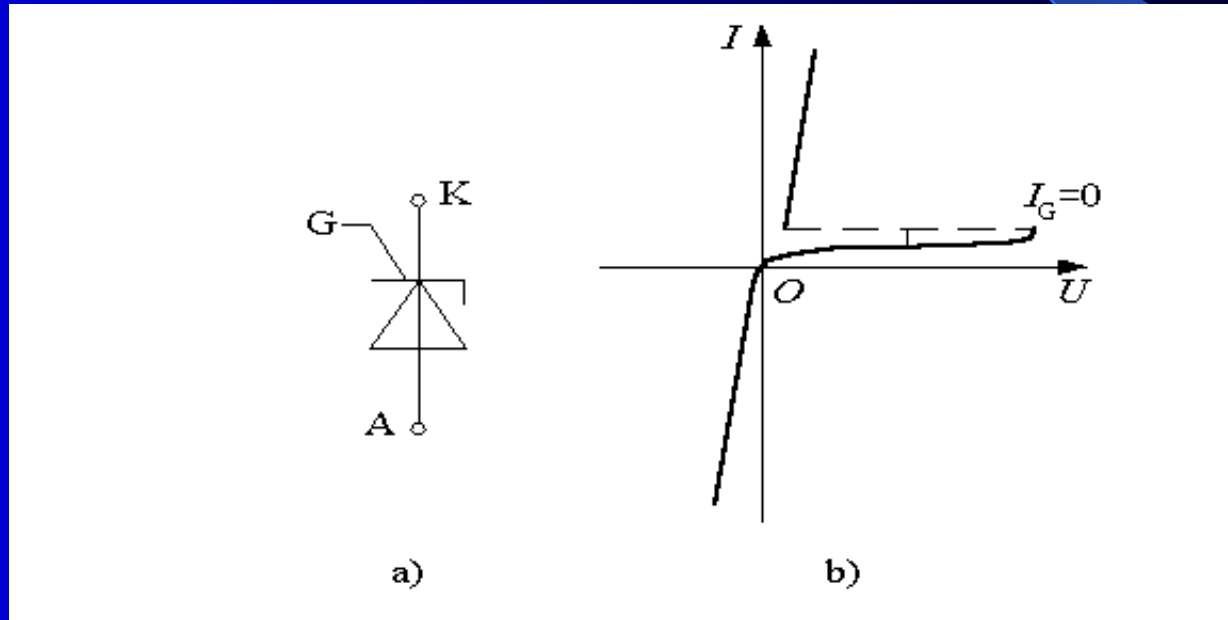
- 光控可控硅的符号及伏安特性曲线

逆导晶闸管 RCT

- **逆导可控硅**（Reverse Conducting Thyristor——RCT）
 - 将可控硅反并联一个二极管制作在同一管芯上的功率集成器件；
 - 具有正向压降小、关断时间短、高温特性好、额定结温高等优点；
 - 逆导可控硅的额定电流有两个，一个是可控硅电流，一个是反并联二极管的电流；
 - 常应用于各类逆变器和斩波器的应用中。

逆导晶闸管 RCT

- 逆导可控硅 (Reverse Conducting Thyristor — RCT)



- 逆导可控硅的符号及伏安特性曲线

快速晶闸管 FST

- **快速可控硅**（Fast Switching Thyristor——FST）
 - 包括所有专为快速应用而设计的可控硅，有快速可控硅和**高频可控硅**（10kHz 以上）；
 - 管芯结构和制造工艺进行了改进，开关时间以及 du/dt 和 di/dt 耐量都有明显改善；
 - 普通可控硅关断时间数百微秒，快速可控硅数十微秒，高频可控硅 $10\mu\text{s}$ 左右；
 - 高频可控硅的不足在于其电压和电流定额都不易做高；
 - 由于工作频率较高，选择通态平均电流时不能忽略其开关损耗的发热效应；
 - FST 由于允许长期通过的电流有限，所以其不宜在低频下工作。

MOS 控制晶闸管 MCT

- **MCT** (**MOS C**ontrolled **T**hystistor)
—— MOSFET 与晶闸管的复合

- MCT 结合了二者的优点：
 - MOSFET 的高输入阻抗、低驱动功率、快速的开关过程
 - 晶闸管的高电压大电流、低导通压降
- 一个 MCT 器件由数以万计的 MCT 元组成，每个元的组成为：一个 PNP 晶闸管，一个控制该晶闸管开通的 MOSFET，和一个控制该晶闸管关断的 MOSFET
- MCT 曾一度被认为是一种最有发展前途的电力电子器件。因此，20 世纪 80 年代以来一度成为研究的热点。但经过十多年的努力，其关键技术问题没有大的突破，电压和电流容量都远未达到预期的数值，未能投入实际应用。目前，IGBT 更被看好。

静电感应晶闸管 SITH

- **静电感应晶闸管**（ **Static Induction Thyristor** —— **SITH** ）
- 1972 年，在 SIT 的漏极层上附加一层与漏极层导电类型不同的发射极层而得到，因其工作原理与 SIT 类似，门极和阳极电压均能通过电场控制阳极电流，因此 SITH 又被称为场控晶闸管（ **Field Controlled Thyristor —— FCT** ）；
- 比 SIT 多了一个具有少子注入功能的 PN 结， SITH 是两种载流子导电的双极型器件，具有电导调制效应，通态压降低、通流能力强。其很多特性与 GTO 类似，但开关速度比 GTO 高得多，是大容量的快速器件；
- SITH 一般也是正常导通型（栅极不加信号时导通），但也有正常关断型。此外，其制造工艺比 GTO 复杂得多，电流关断增益较小，因而其应用范围还有待拓展。

集成门极换流晶闸管 IGCT

- **集成门极换流晶闸管**（**Integrated Gate-Commutated Thyristor——IGCT**），也称（**Gate-Commutated Thyristor ——GCT**）
- 20 世纪 90 年代后期出现，结合了 IGBT 与 GTO 的优点，容量与 GTO 相当，开关速度快 10 倍，且可省去 GTO 庞大而复杂的缓冲电路，只不过所需的驱动功率仍很大；
- 目前正在与 IGBT 等新型器件激烈竞争，试图最终取代 GTO 在大功率场合的位置。

