



电力二极管与晶闸管

■ 重要知识点

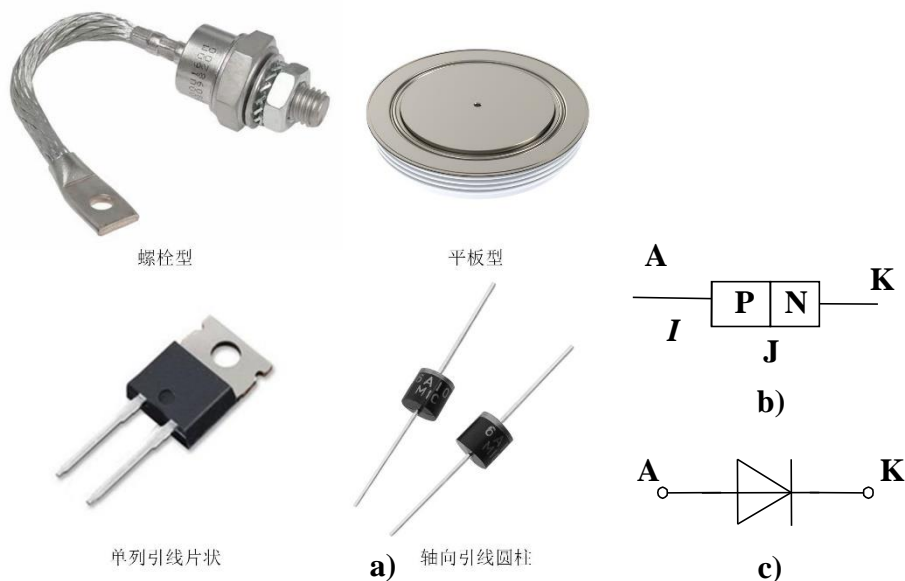
- 基本结构与工作原理
- 电路符号
- 静态特性与动态特性
- 电压定额与电流定额。



不可控器件——电力二极管

■ 电力二极管 (Power Diode)

- 结构和原理简单，工作可靠
- 20世纪50年代初开始，广泛应用于电能变换等工业应用领域。



- 以半导体PN结为基础——单向导电性
- 由一个面积较大的PN结和两端引线以及封装组成
- 外形——螺栓型、平板型等多种封装
- A 阳极（电流流入）；K 阴极（电流流出）。

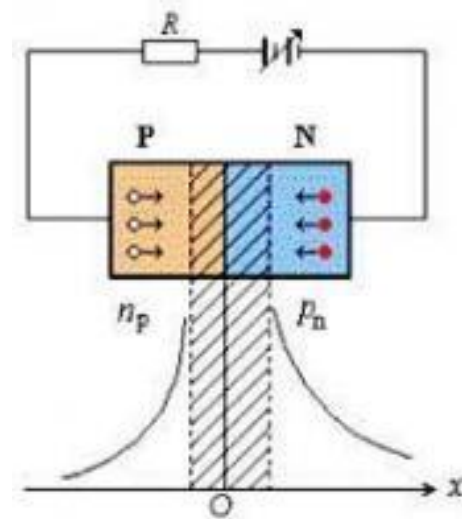
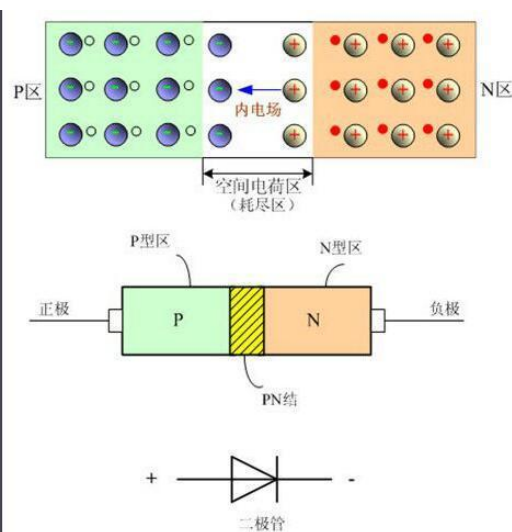
图2-2 电力二极管的外形、结构和电气图形符号
a) 外形 b) 基本结构 c) 电气图形符号



不可控器件——电力二极管

■回顾：二极管的基本原理——PN结的单向导电性

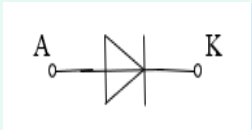
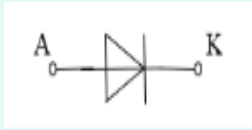
- ◆在一块单晶半导体中，一部分掺有受主杂质是P型半导体，另一部分掺有施主杂质是N型半导体时，P型半导体和N型半导体的交界面附近的过渡区称为PN结。
- ◆当PN结外加正向电压（正向偏置）时，在外电路上则形成自P区流入而从N区流出的电流（扩散电流），称为**正向电流 I_F** ，这就是PN结的**正向导通状态**。
- ◆当PN结外加反向电压时（反向偏置）时，反向偏置的PN结表现为**高阻态**，形成漂移电流（数值很小），PN结几乎没有电流流过，被称为**反向截止状态**。





不可控器件——电力二极管

问题的提出：从“信息二极管”到“电力二极管”

	信息二极管	电力二极管
结构基础	PN结/单向导电性	PN结/单向导电性
电路符号		
导电方向	横向导电/平行于硅片表面	纵向导电/垂直于硅片表面→提高通流能力
漂移区	无	有/P、N之间增加N-层→PiN，提高耐压
电导调制效应	无	有/正向阳极电流较大时维持低阻态→降低通态压降



不可控器件——电力二极管

■ 静态特性（伏安特性）

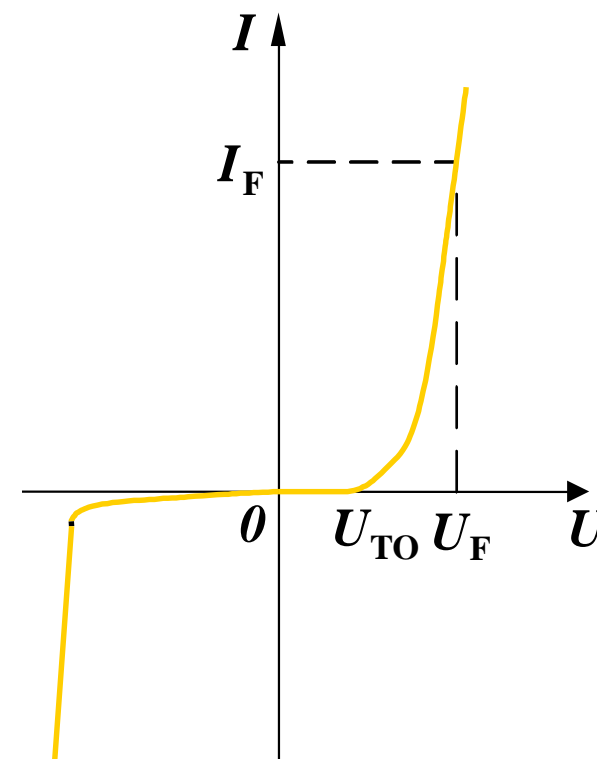
□ 正向电压降 U_F

电压增大到一定值（门槛电压 U_{TO} ），正向电流才开始明显增加，进入稳定导通状态（正向电流： I_F 。 U_F 为与 I_F 对应的电力二极管两端的电压）

□ 反向漏电流

承受反向电压时，只有少子引起的微小而数值恒定的阳极电流

思考： 电力二极管理想的静态特性应该什么样？



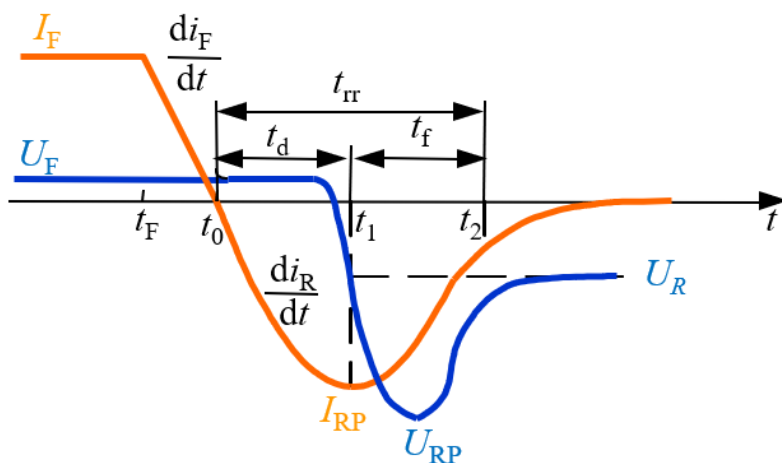
电力二极管的伏安特性



不可控器件——电力二极管

■ 动态特性

- 通态和断态之间转换过程中 U - I 特性。
- 结电容的存在，使得电力二极管的阳极电压-阳极电流 (U - I) 特性是随时间变化的



电力二极管的动态过程波形
正向偏置转换为反向偏置

□ 通态→断态：由正向偏置转换为反向偏置

电力二极管的关断并不是立即实现的，而是须经过一段短暂的时间才能重新获得反向阻断能力，进入截止状态。记

t_0 : 正向电流降为零的时刻

t_1 : 反向电流达最大值时刻

t_2 : 电流变化率接近于零的时刻

在关断之前有较大的反向电流出现，并伴随有明显的反向电压过冲。

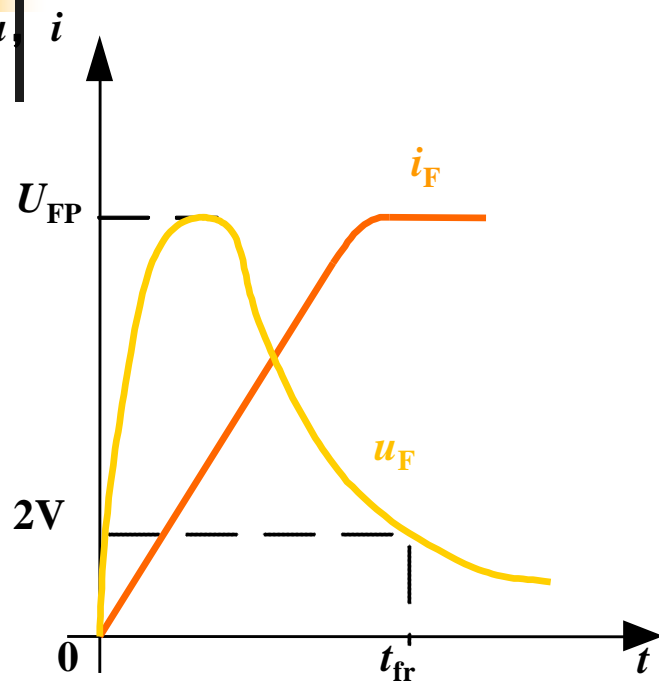
延迟时间: $t_d = t_1 - t_0$

电流下降时间: $t_f = t_2 - t_1$

反向恢复时间: $t_{rr} = t_d + t_f$ 。



不可控器件——电力二极管



电力二极管的动态过程波形
零偏置转换为正向偏置

□ 断态→通态：由零偏置转换为正向偏置

☞ 阳极电压先出现一个过冲 (U_{FP})，经过一段时间 ($0-t_{fr}$) 后才趋于接近稳态压降的某个值 (例如，2V)。 t_{fr} 称为正向恢复时间

☞ 出现电压过冲的原因:电导调制效应起作用所需的大量少子，需要一定的时间来储存，在达到稳态导通之前管压降较大

☞ 正向电流的上升会因器件自身的电感而产生较大压降。电流上升率越大， U_{FP} 越高。



不可控器件——电力二极管

■ 最高工作结温 T_{JM}

- ◆ 结温是指管芯PN结的平均温度，用 T_J 表示。
- ◆ 最高工作结温 T_{JM} 是指在PN结不致损坏的前提下所能承受的**最高平均温度**。
通常在125~175°C范围之内。

■ 正向平均电流 $I_{F(AV)}$

- ◆ 指电力二极管长期运行时，在指定的管壳温度（简称壳温，用 T_C 表示，低于结温）和散热条件下，其允许流过的最大**工频正弦半波电流的平均值**。
- ◆ $I_{F(AV)}$ 是按照电流的发热效应来定义的，使用时应按**有效值相等**的原则来选取电流定额，并应留有1.5-2倍的裕量
- ◆ 有效值与平均值

■ 浪涌电流 I_{FSM}

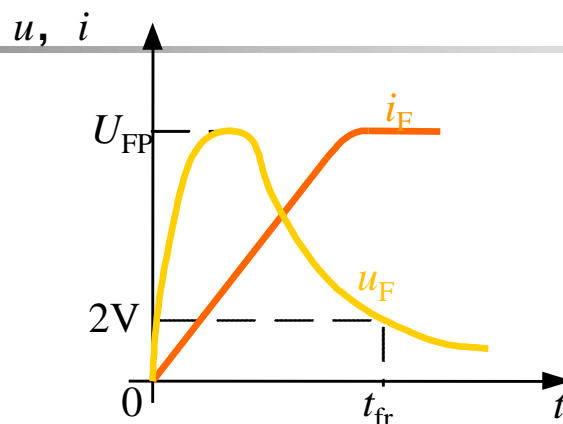
- ◆ 指电力二极管所能承受最大的连续一个或几个**工频周期的过电流**。



不可控器件——电力二极管

■ 正向压降 U_F

- ◆指电力二极管在指定温度下，流过某一指定的**稳态正向电流**时对应的正向压降。

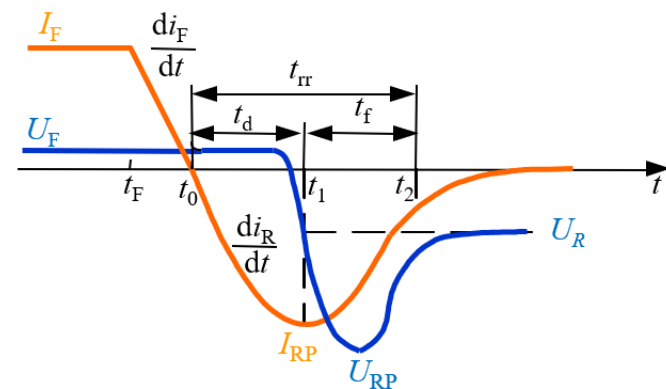


■ 反向重复峰值电压 U_{RRM}

- ◆指对电力二极管所能重复施加的反向最高峰值电压。
- ◆使用时，应当留有**2-3倍**的裕量。

■ 反向恢复时间 t_{rr}

关断过程中延迟时间与反向电流下降时间之和。





不可控器件——电力二极管

- 不同的电力电子电路对电力二极管开关速度要求有所不同
- 普通二极管 (Purpose Diode)
 - ✎ 整流二极管 用于1kHz以下的整流电路中
 - ✎ 反向恢复时间较长，一般在 $5\mu\text{s}$ 以上。
- 快恢复二极管 (Fast Recovery Diode——FRD)
 - ✎ 外延型P-i-N结构使得反向恢复时间可低于50ns
 - ✎ 正向压降也很低 (0.9V左右)
- 肖特基二极管 (Schottky Barrier Diode——SBD)
 - ✎ 反向恢复时间很短 (10~40ns)
 - ✎ 正向压降、开关损耗和通态损耗小，效率高。



阅读资料：快恢复二极管与肖特基二极管

二极管在现实生活中有很多的使用，二极管具有单向导电性能，导通时电流方向是由阳极通过管子流向阴极。为增进大家对二极管的认识，本文将对快恢复二极管、肖特基二极管以及二者的区别予以介绍。如果你对二极管具有兴趣，不妨继续往下阅读哦。

一、快恢复二极管

快恢复二极管是一种具有快速恢复时间的二极管，其特点是具有快速的反向恢复时间和低反向恢复电流。快恢复二极管的结构与普通二极管相似，但其P型区和N型区之间插入了一层高掺杂的P+区或N+区，这种结构使得电荷载流子的扩散速度加快，因此具有快速的反向恢复特性。

快恢复二极管的应用领域广泛，例如逆变器、电源、电机驱动器、电子变压器、高速开关等。由于其快速的反向恢复时间和低反向恢复电流，可以在高频率和高电压的电路中使用，以提高电路效率和稳定性。

恢复二极管的内部结构与普通二极管不同，它是在P型、N型硅材料中间增加了基区I，构成P-I-N硅片。由于基区很薄，反向恢复电荷很小，不仅大大减小了 t_{rr} 值，还降低了瞬态正向压降，使管子能承受很高的反向工作电压。快恢复二极管的反向恢复时间一般为几百纳秒，正向压降约为0.6V，正向电流是几安培至几千安培，反向峰值电压可达几百到几千伏。超快恢复二极管的反向恢复电荷进一步减小，使其 t_{rr} 可低至几十纳秒。20A以下的快恢复及超快恢复二极管大多采用TO-220封装形式。从内部结构看，可分成单管、对管(亦称双管)两种。对管内部包含两只快恢复二极管，根据两只二极管接法的不同，又有共阴对管、共阳对管之分。

二、肖特基二极管

肖特基二极管是一种具有低正向压降和快速开关速度的二极管，它是由金属与半导体PN结组成的。与快恢复二极管不同，肖特基二极管的P型区是由金属与半导体PN结组成的，这种结构使得正向电压下的载流子扩散速度加快，因此具有低正向压降和快速开关速度的特性。

肖特基二极管的应用领域主要集中在低压、低功耗的电路中，例如电源、放大器、逆变器、开关电源等。由于其低正向压降和快速开关速度，可以在低功耗的电路中使用，以提高电路效率和稳定性。



阅读资料：快恢复二极管与肖特基二极管

三、快恢复二极管与肖特基二极管的比较

- 1、材料组成 二极管由两个不同类型的半导体材料组成，而肖特基二极管由金属和半导体材料组成。
- 2、极性 二极管是一种单向导电元件，只允许电流在一个方向上流动。而肖特基二极管也是一种单向导电元件，但它可以在低电压下工作，具有更快的响应速度和更低的噪声。
- 3、正向偏置 在正向偏置下，二极管和肖特基二极管都可以导电。但是，肖特基二极管的正向电压降低，可以在低电压下工作。
- 4、反向偏置 在反向偏置下，二极管和肖特基二极管都不会导电。但是，肖特基二极管的反向击穿电压比普通二极管高。
- 5、响应速度 肖特基二极管具有更快的响应速度和更低的噪声，这使得它在高频应用中非常有用。
- 6、结构不同 快恢复二极管的结构类似于普通二极管，但中间插入了一层高掺杂的区域，而肖特基二极管的结构是由金属与半导体PN结组成的。
- 7、工作原理不同 快恢复二极管的快速恢复特性是由高掺杂区域加快电荷载流子的扩散速度实现的，而肖特基二极管的低正向压降和快速开关速度是由金属与半导体PN结的结构实现的。
- 8、应用领域不同 快恢复二极管主要应用于高频率和高电压的电路中，例如逆变器、电源、电机驱动器、电子变压器、高速开关等；而肖特基二极管主要应用于低功耗的电路中，例如电源、放大器、逆变器、开关电源等。
- 9、价格不同 由于快恢复二极管的结构比较复杂，制造工艺比较复杂，因此价格相对较高；而肖特基二极管的制造工艺相对简单，因此价格相对较低。

四、总结 快恢复二极管和肖特基二极管都是二极管的一种，它们的区别主要在于其结构、工作原理和应用领域。快恢复二极管具有快速的反向恢复特性，适用于高频率和高电压的电路；肖特基二极管具有低正向压降和快速开关速度的特性，适用于低功耗的电路。在选择二极管时，应根据实际应用需求选择合适的型号。



半控型器件—晶闸管

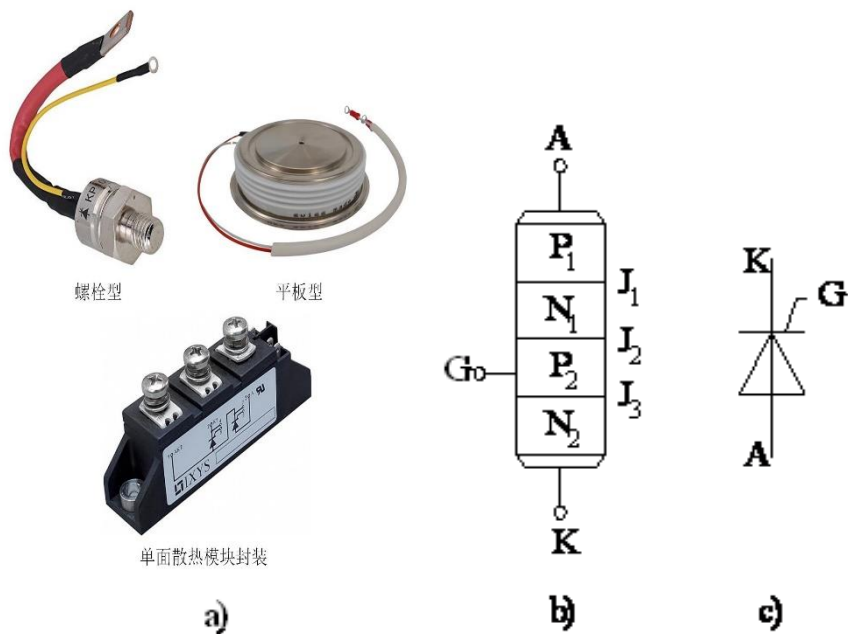


■ 晶闸管（Thyristor）

- 相位控制整流电路中用电力电子开关器件，“开通可控”
- 1956年：美国贝尔实验室（Bell Laboratories）发明了晶闸管
- 1957年：美国通用电气公司（General Electric）开发出了世界上第一只晶闸管产品
- 1958年：商业化
- 也称**可控硅整流器**(Silicon Controlled Rectifier——SCR，简称“**可控硅**”)
 - ✓ 晶闸管的结构与工作原理
 - ✓ 晶闸管的基本特性
 - ✓ 晶闸管的主要参数
 - ✓ 晶闸管的派生器件



半控型器件—晶闸管



晶闸管的外形、结构和电气图形符号

a) 外形 b) 结构 c) 电气图形符号

■ 结构

- ◆ 封装：螺栓型、平板型、模块
- ◆ 引出阳极A、阴极K和门极G
- ◆ 内部结构：PNPN四层，三个PN结

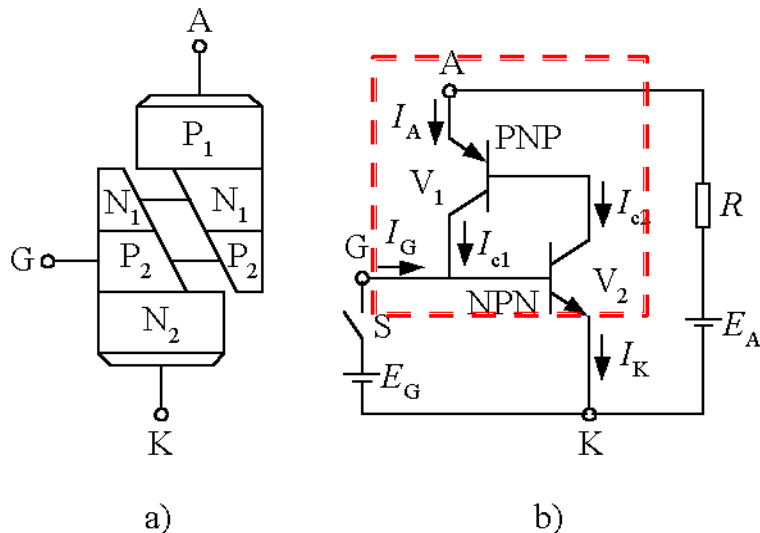
■ 特点

- ◆ 电压和电流容量高
- ◆ 工作可靠
- ◆ 广泛应用于可控整流器



半控型器件—晶闸管

工作原理



晶闸管的双晶体管模型及其工作原理

a) 双晶体管模型 b) 工作原理

□ 根据内部结构，可列出如下方程：

$$I_{c1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \quad I_{c2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2}$$

$$I_K = I_A + I_G \quad I_A = I_{c1} + I_{c2}$$

□ 式中，

α_1 和 α_2 ：分别是晶体管 V_1 和 V_2 的共基极电流增益；

I_{CBO1} 和 I_{CBO2} ：分别是 V_1 和 V_2 的共基极漏电流。

□ 由以上关系，可得出

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

- $I_G=0$ ，阻断状态，晶体管在低发射极电流下 α 很小， $\alpha_1+\alpha_2$ 很小，阳极电流为漏电流。
- S接通， $I_G>0$ ，发射极电流建立，并进入“正反馈”状态， α 迅速增大。当 $\alpha_1+\alpha_2 \rightarrow 1$ 时，晶闸管饱和导通。
- 晶闸管饱和导通之后，即使断开S， V_2 的基极电流仍然存在，晶闸管维持通态→在门极注入脉冲电流即可使晶闸管导通 → “触发”的由来！
- 阳极电流 I_A 的稳态值由 E_A 和 R 的大小决定。



半控型器件—晶闸管

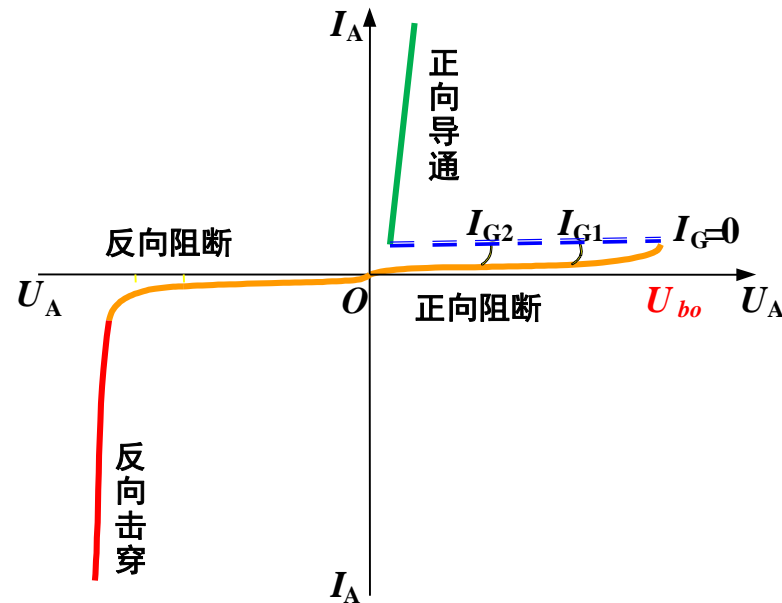
■ 静态特性——伏安特性

□ 正向特性 ($U_A > 0$)

- $I_G=0$: 正向阻断状态, I_A 为正向漏电流; U_A 增大至正向转折电压 U_{bo} → 漏电流急剧增大 → 非正常开通;
- $I_G>0$: 随门极电流 I_G 的增大, 导通所需正向电压降低 → 正常开通;
- 导通后晶闸管静态工作点 (U_A, I_A) 由外电路的电压和负载决定。

□ 反向特性 ($U_A < 0$)

- 类似于二极管的反向特性——极小的反向漏电流: 反向阻断状态;
- U_A 超过反向击穿电压后, 外电路如无限制措施, 则反向漏电流急剧增大, 导致晶闸管因反向击穿造成管芯温度过高而热损坏。



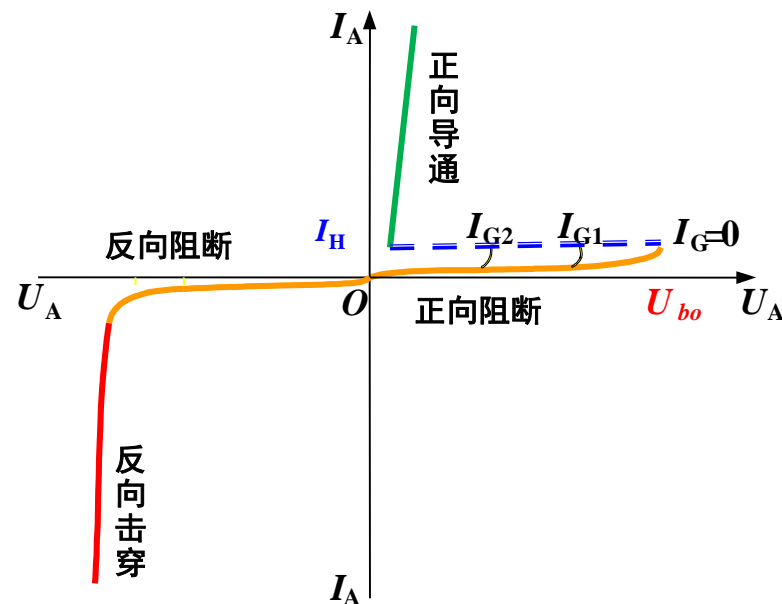
晶闸管的伏安特性 ($I_{G2} > I_{G1} > I_G$)



半控型器件—晶闸管

对静态特性的进一步理解

- 当晶闸管承受正向阳极电压时，仅在门极有触发电流的情况下晶闸管才能正常开通——**开通条件**
- 若要使已导通的晶闸管关断，只能利用外加反向电压或增大阳极回路阻抗使流过晶闸管的电流降到接近于零的某一数值 (I_H) 以下——**关断条件**



晶闸管的伏安特性 ($I_{G2} > I_{G1} > I_G$)



半控型器件—晶闸管

■ 动态特性——开通过程

■ 延迟时间 t_d ($0.5 \sim 1.5 \mu\text{s}$):

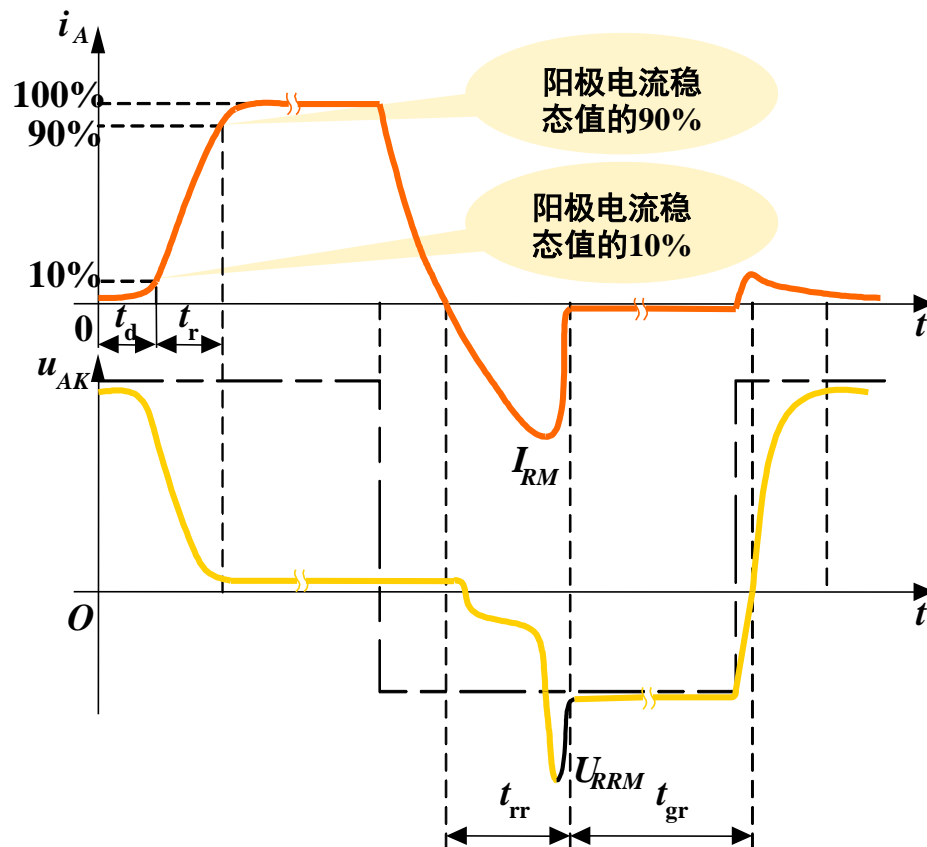
从门极电流阶跃时刻开始到阳极电流上升到稳态值的10%所需的时间称为延迟时间 t_d ;

■ 上升时间 t_r ($0.5 \sim 3 \mu\text{s}$):

阳极电流从稳态值的10%上升至90%所需的时间称为上升时间 t_r 。

■ 开通时间为延迟时间 t_d 与上升时间 t_r 的和: $t_{gt} = t_d + t_r$

■ 思考: 门极电流、回路电感、阳极电压对 t_{gt} 有何影响?



晶闸管的开通和关断过程波形

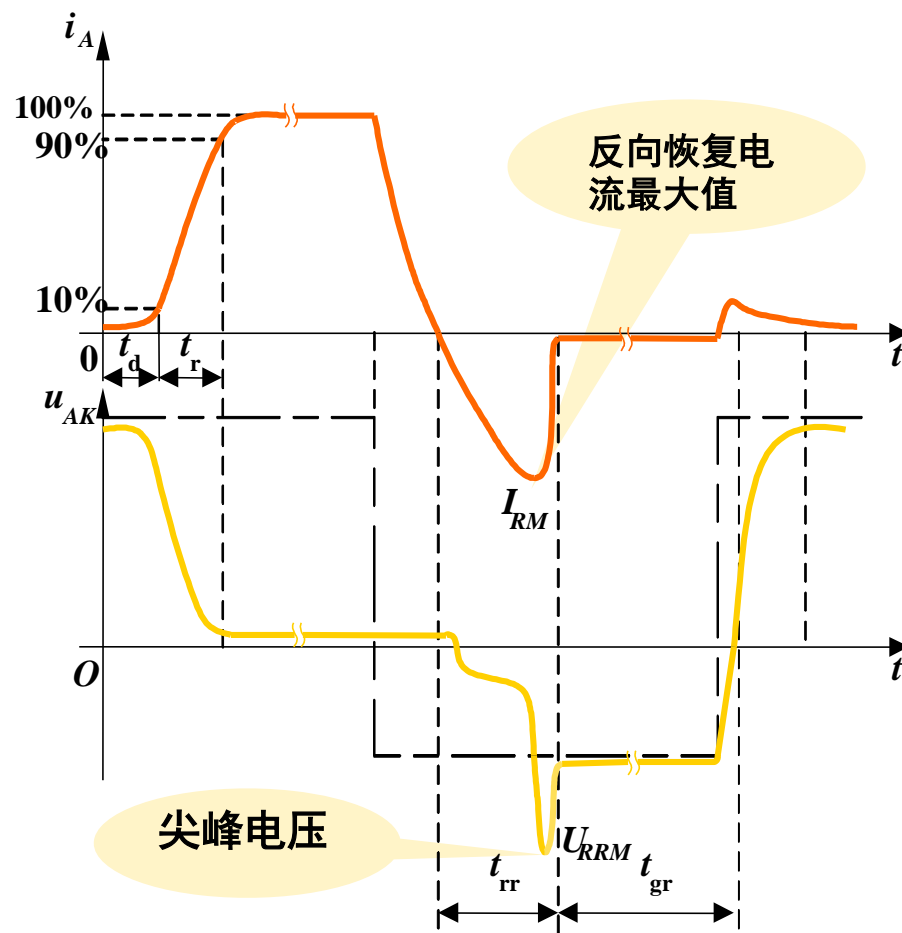


半控型器件—晶闸管

动态特性——关断过程

- 反向阻断恢复时间 t_{rr}
- 正向阻断恢复时间 t_{gr}
- 关断时间为上述两个时间之和: $t_q = t_{rr} + t_{gr}$
- 关断时间一般约几百微秒。

■在正向阻断恢复时间内，如果重新对晶闸管施加正向阳极电压，则无论是否存在正向门极电流，晶闸管都会恢复通态→反向电压时长足够才能使晶闸管可靠关断！



晶闸管的开通和关断过程波形



半控型器件—晶闸管

■ 电压定额

□ 断态重复峰值电压 U_{DRM} 允许**重复**加在器件上的**正向峰值电压**（例如，KP5000A：100-6000V）

□ 反向重复峰值电压 U_{RRM} 允许**重复**加在器件上的**反向峰值电压**（KP5000A：100-6000V）

☞ 取 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小者对应的标准值作为**额定电压**

☞ 选用晶闸管时，额定电压值留有 2-3 倍的安全裕量

□ 通态（峰值）电压 U_{TM}

通以某一规定倍数的额定通态平均电流时的瞬态峰值电压（KP5000A：1.8V@5000A）

■ 电流定额

□ 通态平均电流 $I_{\text{T(AV)}}$ 允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值（KP5000A：5000A@55°C）

☞ 按照正向电流造成的器件本身的通态损耗的**发热效应**来定义的。

☞ 一般取其通态平均电流为按发热效应相等（即**有效值相等**）的原则所得计算结果的**1.5~2**倍。

■ 例题（p.45 习题2-4，2-5）→ 理解“**电流有效值相等**”原则和电压电流额定值的确定



半控型器件—晶闸管

□ 维持电流 I_H

使晶闸管维持导通所必需的**最小阳极电流**，一般为几十到几百毫安
(KP5000A: 20-300 mA)

引申：关断晶闸管的根本途径——**阳极电流 < 维持电流**

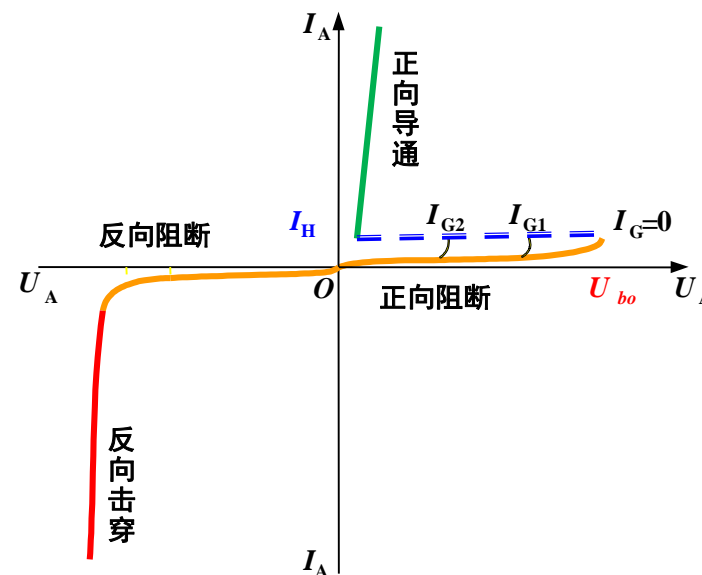
□ 擎住电流 I_L

从断态转入通态并移除触发信号后，能维持导通所需**最小阳极电流**

I_L 约为 I_H 的**2~4倍**——体现了对触发脉冲的宽度的要求

□ 浪涌电流 I_{TSM}

不重复性**最大正向过载电流** (KP5000A: 44kA, 10ms)。



晶闸管的伏安特性 ($I_{G2} > I_{G1} > I_G$)



半控型器件—晶闸管

■ 动态参数

□ 开通时间 t_{gt} 与 关断时间 t_q （如前述）

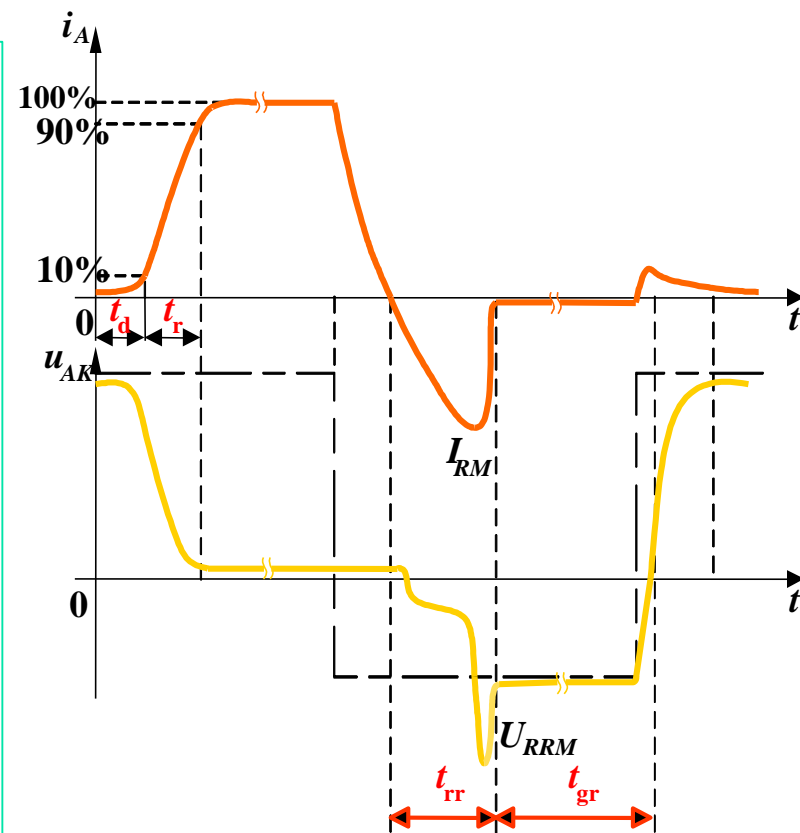
□ 断态电压临界上升率 du/dt

- 在额定结温和门极开路的条件下，允许加在晶闸管阳极电压的最大上升率
- 阳极电压上升率过大使等效结电容充电电流（位移电流）增大，起到注入门极电流的作用，会使晶闸管误导通。例如，KP5000A：1000V/ μ S

□ 通态电流临界上升率 di/dt

- 在规定条件下，晶闸管能承受而无有害影响的**最大通态电流上升率**。
- 如果电流上升太快，可能造成局部集中过热而使晶闸管损坏，例如，KP5000A：500A/ μ S。

■ 思考：如何减小晶闸管的 du/dt 、 di/dt ？



晶闸管的开通和关断过程波形



半控型器件—晶闸管

□ 缓冲电路 (Snubber Circuit) 又称为吸收电路, 其作用是抑制电力电子器件的过电压、 du/dt 或者过电流和 di/dt , 减小器件的开关损耗

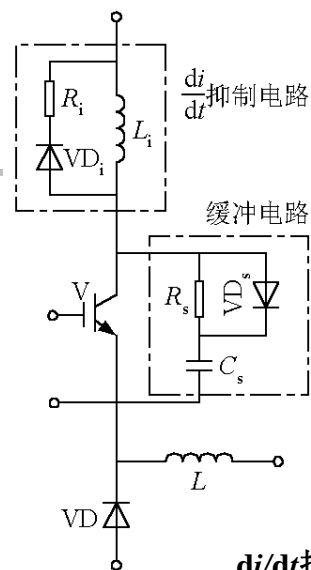
□ 缓冲电路分类:

✓ 关断缓冲 (du/dt 抑制) 电路、开通缓冲 (di/dt 抑制) 电路和复合缓冲电路 (关断缓冲电路和开通缓冲电路结合在一起)

✓ 耗能式缓冲电路和馈能式缓冲电路

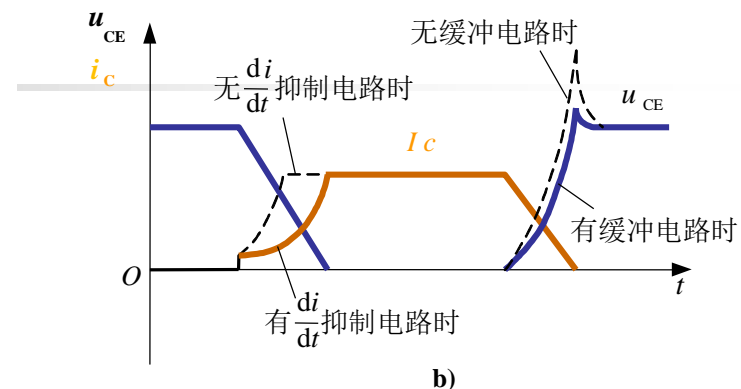
✎ 耗能式缓冲电路: 缓冲电路中储能元件的能量消耗在其吸收电阻上

✎ 馈能式缓冲电路: 缓冲电路能将其储能元件的能量回馈给负载或电源, 也称无损吸收电路。

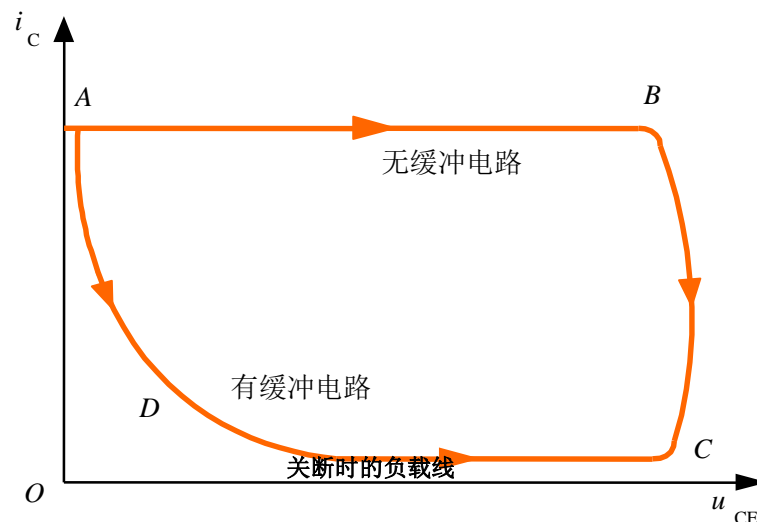


a)

di/dt 抑制电路和充放电型 RCD 缓冲电路及波形

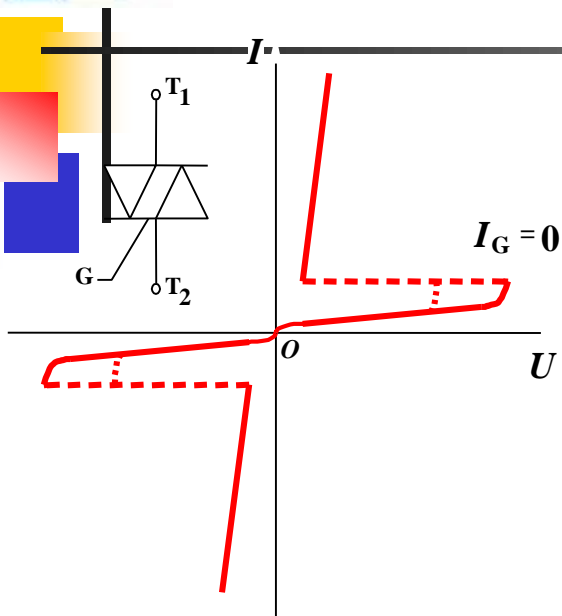


b)





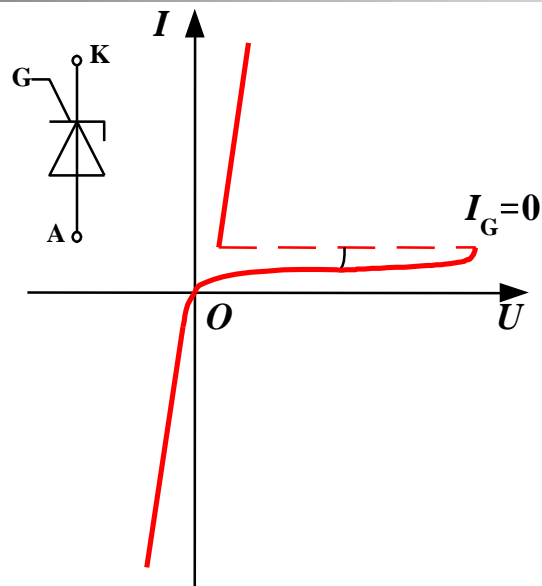
晶闸管的派生器件



双向晶闸管的电气图形
符号和伏安特性

(Triode AC Switch——TRIAC
或 Bidirectional triode thyristor)

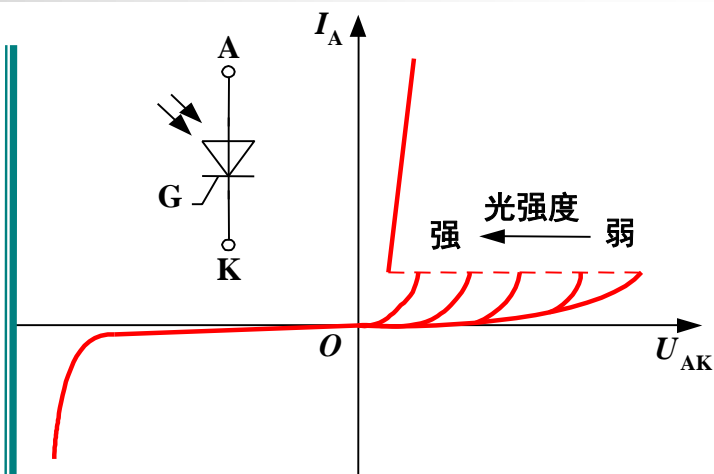
- 相当于一对反并联联接的普通晶闸管的集成。
- 门极使器件在主电极的正反两方向均可触发导通



逆导晶闸管的电气图形
符号和伏安特性

(Reverse Conducting Thyristor——RCT)

- 将晶闸管与反并联的二极管制作在同一管芯上的功率集成器件
- 可用于不需要阻断反向电压的电路中。



光控晶闸管的电气图形
符号和伏安特性

(Light Triggered Thyristor——LTT)

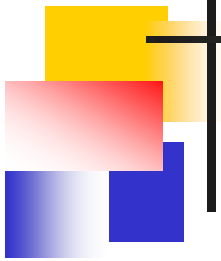
- 利用一定波长的光照信号触发导通的晶闸管。
- 采用光触发保证了主控绝缘，且避免电磁干扰的影响，广泛应用在高压场合。



半控型器件—晶闸管

某产品典型参数

Type	V _{DRM} /V _{RRM}	I _{T(AV)}	I _{TSM}	dv/dt	di/dt	I _{DRM} /I _{RRM}	I _{GT}	V _{GT}	I _H	V _{TM} /I _{TM}	R _{TH(J-ha)}	T _{jm}	M ²	Outline
		T _{HS} 55°C	10ms					25°C						
	V	A	KA	V/μS	A/μS	mA	mA	V	mA	V/A	°C/W	°C	KN	
KP100A	100-6000	100	2.5	300	100	30	35-250	0.8-2.0	20-150	1.2/300	0.090	125	3.3-5.5	A-1.7
KP200A	100-6000	200	2.5	300	100	30	35-250	0.8-2.0	20-150	1.2/600	0.090	125	3.3-5.5	A-2.8, 12, 15
KP300A	100-6000	300	3.8	500	100	30	35-250	0.8-2.0	20-200	1.5/900	0.065	125	5.3-10	A-3.9, 16
KP400A	100-6000	400	5	500	200	40	35-250	0.8-2.0	20-200	1.5/1200	0.040	125	10-20	A-4.10, 13, 17, 18
KP500A	100-6000	500	6.4	800	200	40	35-250	0.8-2.0	20-250	1.6/1500	0.040	125	10-20	A-4.10, 13, 17, 18
KP600A	100-6000	600	6.4	800	300	40	35-250	0.8-2.0	20-250	1.6/1800	0.033	125	10-20	A-5.19
KP800A	100-6000	800	10	1000	300	50	40-300	0.8-2.0	20-250	1.8/2400	0.022	125	19-26	A-5.19
KP1000A	100-6000	1000	13	1000	500	80	40-300	0.8-3.0	20-300	1.8/3000	0.022	125	19-26	A-6.11, 14, 20
KP1200A	100-6000	1200	15	1000	500	120	40-300	0.8-3.0	20-300	1.8/3000	0.020	125	21-30	A-20.21
KP1500A	100-6000	1500	20	1000	500	120	40-300	0.8-3.0	20-300	1.8/3000	0.020	125	21-30	A-20.21
KP1800A	100-6000	1800	22.5	1000	500	160	40-300	0.8-3.0	20-300	1.8/3000	0.016	125	30-40	A-22.23, 24, 25
KP2000A	100-6000	2000	25	1000	500	160	40-300	0.8-3.0	20-300	1.8/4000	0.016	125	30-40	A-22.23, 24, 25
KP2500A	100-6000	2500	31	1000	500	200	40-300	0.8-3.0	20-300	2.0/5000	0.011	125	35-47	A-22.23, 24, 25
KP3000A	100-6000	3000	38	1000	500	200	40-300	0.8-3.0	20-300	2.0/5000	0.011	125	35-47	A-22.23, 24, 25
KP3500A	100-6000	3500	44	1000	500	250	40-300	0.8-3.0	20-300	2.0/5000	0.011	125	35-47	A-22.23, 24, 25
KP4000A	100-6000	4000	44	1000	500	250	40-300	0.8-3.0	20-300	2.0/5000	0.009	125	70-85	A-22.23, 24, 25
KP5000A	100-6000	5000	44	1000	500	250	40-300	0.8-3.0	20-300	1.8/5000	0.0135	125	70-85	A-22.23, 24, 25



The End