

第 2 章 电力电子器件

2.1 电力电子器件概述

2.2 不可控器件-电力二极管

2.3 半控型器件-晶闸管

2.4 典型全控型器件

• 学习内容:

- 电力电子器件的概念、特点和分类
- 电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应注意的一些问题

• 目标:

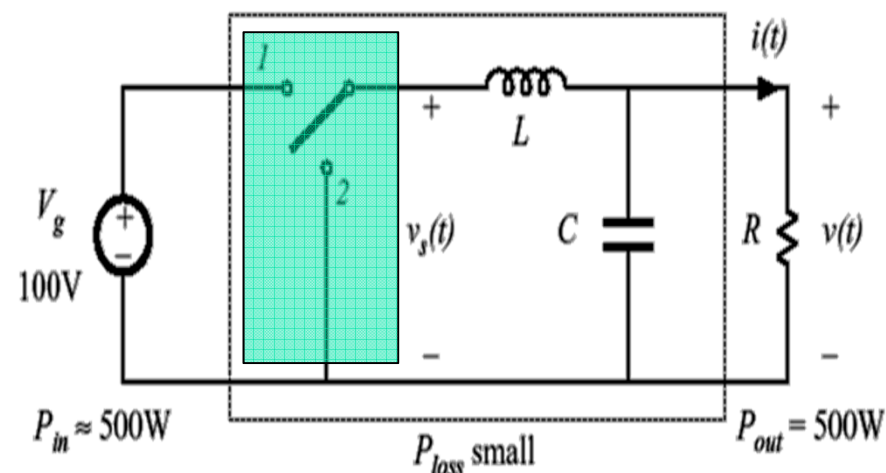
- 正确地选择、使用器件

2.1 电力电子器件概述

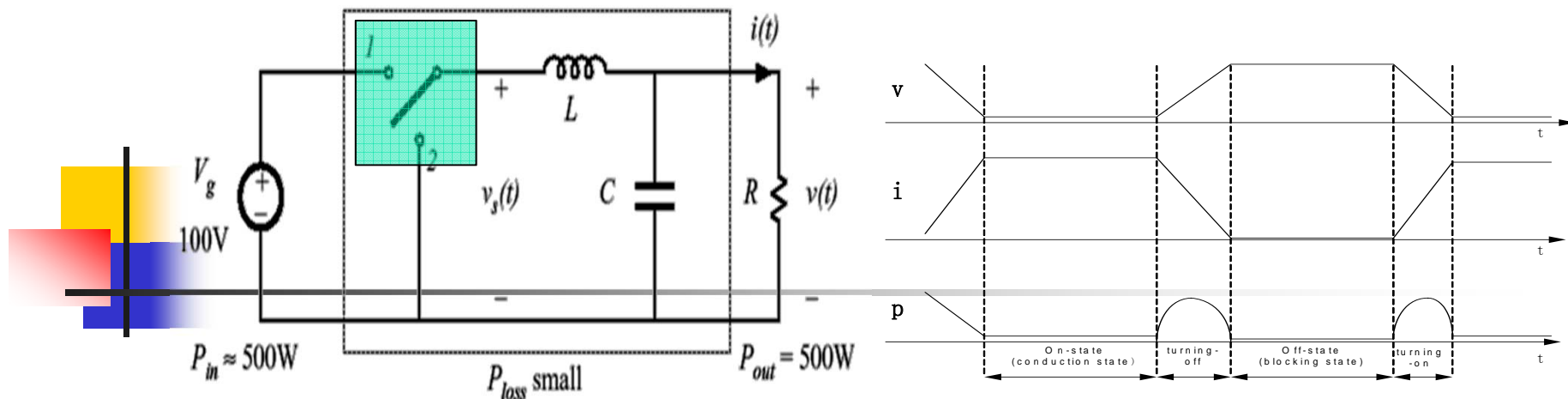
2.1.1 电力电子器件的概念和特征

概念:

- **主电路**---在电气系统中，直接承担着电能变换或控制的任务的电路。
- **电力电子器件**---直接用在主电路中，实现电能变换或控制的电子器件。



- 电力电子器件-电力半导体器件（采用的主要材料是硅）



电力电子器件的特征:

- 1) 承受一定的**高电压**和**大电流**的能力, 处理**电功率**: **mW—MW**, (处理的电功率远大于电子器件)。
- 2) 为了减小本身损耗, 工作在**开关状态**下 (通态/断态)。
- 3) 要求信息电子电路构成**控制电路**和一定功率的**驱动电路**。
- 4) 自身产生四种功率损耗。

{	通态损耗	{	开通损耗
	断态损耗		关断损耗
	开关损耗		

一般要安装散热器。

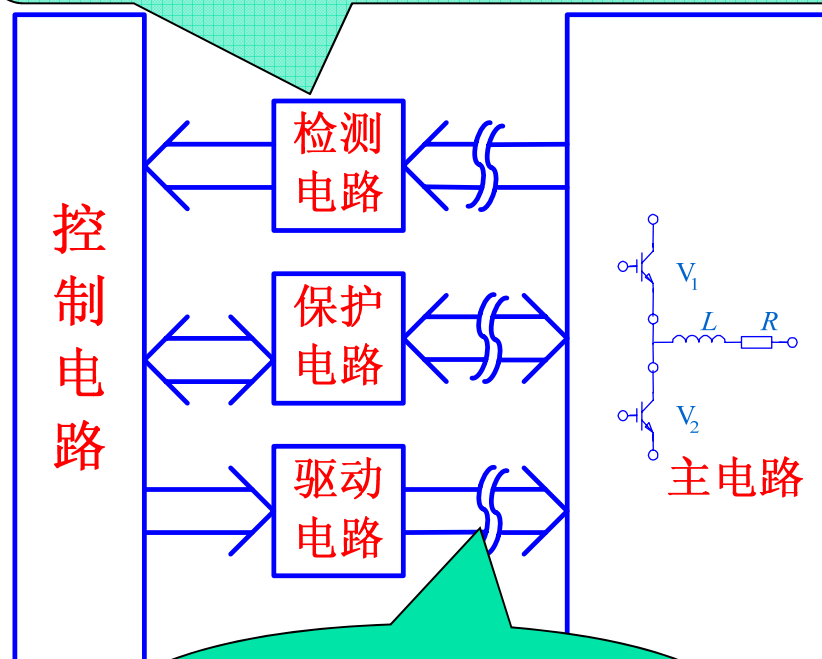
2.1.2 应用电力电子器件的系统组成

电力电子系统组成，包括：

- 以电力电子器件为核心的主电路
- 控制电路
- 驱动电路
- 检测与保护电路

注意三端电力电子器件的控制端和功率端的连接方式。器件的**公共端**(参考点)：主电路电流流出的那个端子。

在主电路和控制电路中附加一些电路，以保证电力电子器件和整个系统正常可靠运行。





2.1.3 电力电子器件的分类

■ 按照器件能够被控制的程度，分三类

◆ 不可控器件

不能用控制信号来控制其通断，不需要驱动电路，其导通和关断由外电路的电压或电流决定（**电力二极管**）。

◆ 半控型器件

控制信号可控制其导通但不能控制其关断。关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的（**晶闸管**）。

◆ 全控型器件

通过控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断。
（又称自关断器件，**IGBT**和**电力 MOSFET**）。

■ 按照驱动信号的性质，分两类

◆ 电流驱动型

通过从控制端注入或者抽出**电流**来实现导通或者关断的控制。

◆ 电压驱动型

仅通过在控制端和公共端之间施加一定的**电压**信号就可实现导通或者关断的控制。

亦称为场控（电场控制）型器件。驱动亦消耗一定的功率，但比起电流驱动型器件的驱动功率要小得多。

■ 按照驱动信号的波形，分两类（电力二极管除外）

◆ 脉冲触发型

在控制端施加一个**电压或电流的脉冲**信号来实现器件的开通或者关断的控制。

◆ 电平控制型

在控制端**持续**施加一定电平的电压或电流信号来使器件开通并**维持**在导通状态或者关断并维持在阻断状态。



■ 按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况，分三类

◆ 单极型器件

由一种载流子参与导电的器件。

◆ 双极型器件

由电子和空穴两种载流子参与导电的器件。

◆ 复合型器件

由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件。

半导体器件的通断过程需要一定的时间，单极型器件的开关速度最快。



本课程涉及的电力半导体器件

- 不可控器件：普通整流二极管、恢复整流二极管、肖特基整流二极管
- 半控型器件：普通晶闸管SCR、快速晶闸管FST、双向晶闸管TRIAC、逆导晶闸管RCT、光控晶闸管LTT。
- 全控型器件：门极可关断晶闸管GTO、双极电力晶体管GTR、电力场效应晶体管MOSFET、绝缘栅双极晶体管IGBT。MOS控制晶闸管MCT、静电感应晶体管SIT、静电感应晶闸管SITH、集成门极换流晶闸管IGCT、基于宽禁带半导体材料的电力电子器件。
- 功率集成电路与功率集成电力电子模块。



2.1.4 本章内容和学习要点

内容:

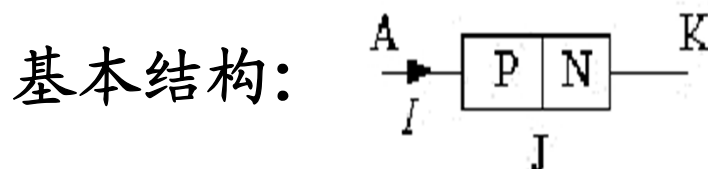
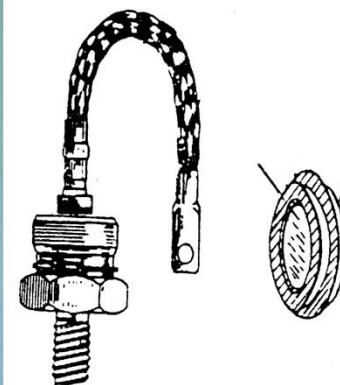
- 6种器件的工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用

要点:

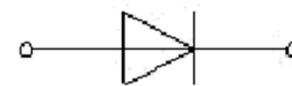
- 基本特性及其基本工作原理。
- 器件的选择、使用（参数和特性曲线的使用方法）

2.2 不可控器件——电力二极管

- **电力二极管**结构和原理简单，工作可靠，自20世纪50年代初期就获得应用。在电力电子电路中电力二极管往往是不可缺少的。
- **快恢复二极管**和**肖特基二极管**，分别在中高频整流和逆变，以及低压高频整流的场合，具有不可替代的地位。



电气符号:





2.2.1 电力二极管的工作原理

工作原理：与信息电子电路中的二极管相同。

PN结的单向导电性。

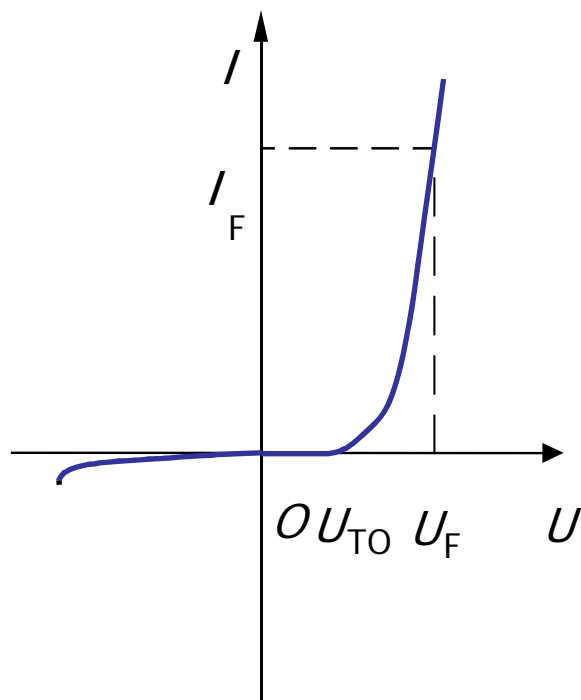
状态 参数	正向导通	反向截止	反向击穿
电流	正向大	几乎为零	反向大
电压	维持 1 V	反向大	反向大
阻态	低阻态	高阻态	——

电导调制效应：维持二极管通态时为低阻状态，电压约为1V。

电容效应：影响PN结的工作频率，使其单向导电性变差，甚至不能工作。

2.2.2 电力二极管的基本特性

(1) 静态特性



- ◆ 主要是指其伏安特性。
- ◆ 门槛电压 U_{TO} : 正向电流 I_F 开始明显增加所对应的电压。0.4 ~ 0.5V。
- ◆ 正向电压降 U_F : 与 I_F 对应的电力二极管两端的电压。0.4 ~ 1.2V
- ◆ 承受反向电压时, 只有微小而数值恒定的反向漏电流。微安级。
- ◆ 反向击穿电压 U_B 。注意热击穿。

(2) 动态特性:

因为结电容的存在，电压—电流特性是随时间变化的，这就是电力二极管的动态特性，并且往往专指反映通态和断态之间转换过程的开关特性。

◆ 由正向偏置转换为反向偏置的关断过程:

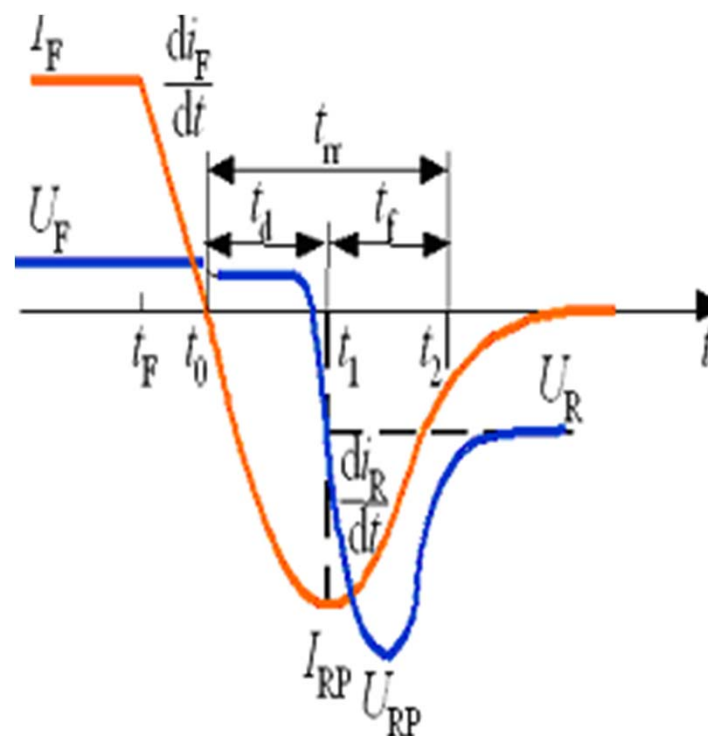
电力二极管并不能立即关断，而是须经过一段短暂的时间才能重新获得反向阻断能力，进入截止状态。

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: $t_{rr} = t_d + t_f$



◆ 由零偏置转换为正向偏置

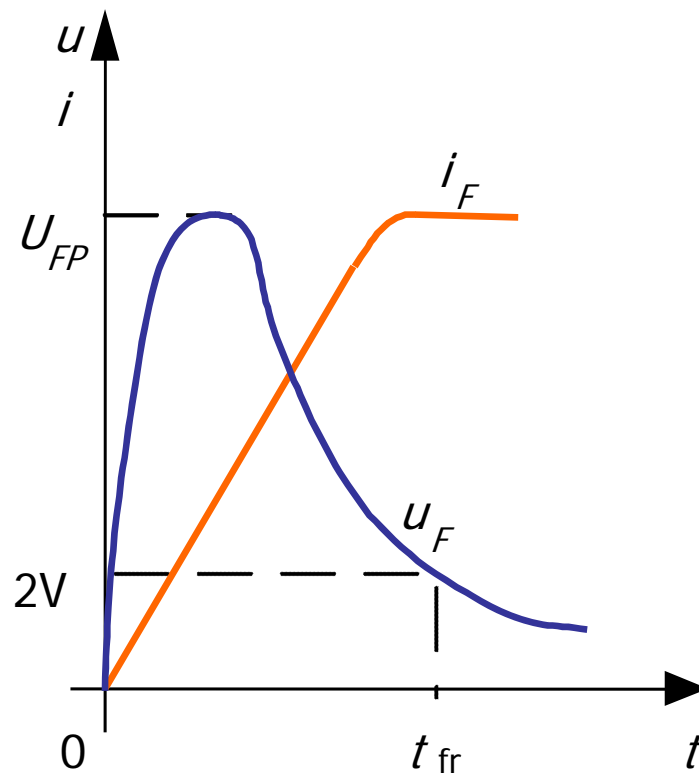
◆ 正向压降先出现一个过冲 U_{FP} ，经过一段时间才趋于接近稳态压降的某个值（如2V）。

◆ 正向恢复时间 t_{fr}

◆ 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。





2.2.3 电力二极管的主要参数

■ 1. 正向平均电流 $I_{F(AV)}$

◆ **额定电流**：长期运行时，在指定的管壳温度和散热条件下，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，并应留有一**倍左右**的安全裕量。

■ 2. 正向压降 U_F

◆ 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。

■ 3. 反向重复峰值电压 U_{RRM}

◆ 对电力二极管所能重复施加的反向最高峰值电压。

◆ 使用时，应当留有一**倍左右**的安全裕量。



■ 4. 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。

◆ T_{JM} 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。

■ 5. 反向恢复时间 t_{rr}

$$t_{rr} = t_d + t_f$$

■ 6. 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**。

电力电子器件在**过流、过压或过温**时都可能造成永久性损坏，使用中应充分注意。

2.3 半控型器件——晶闸管/可控硅/SCR

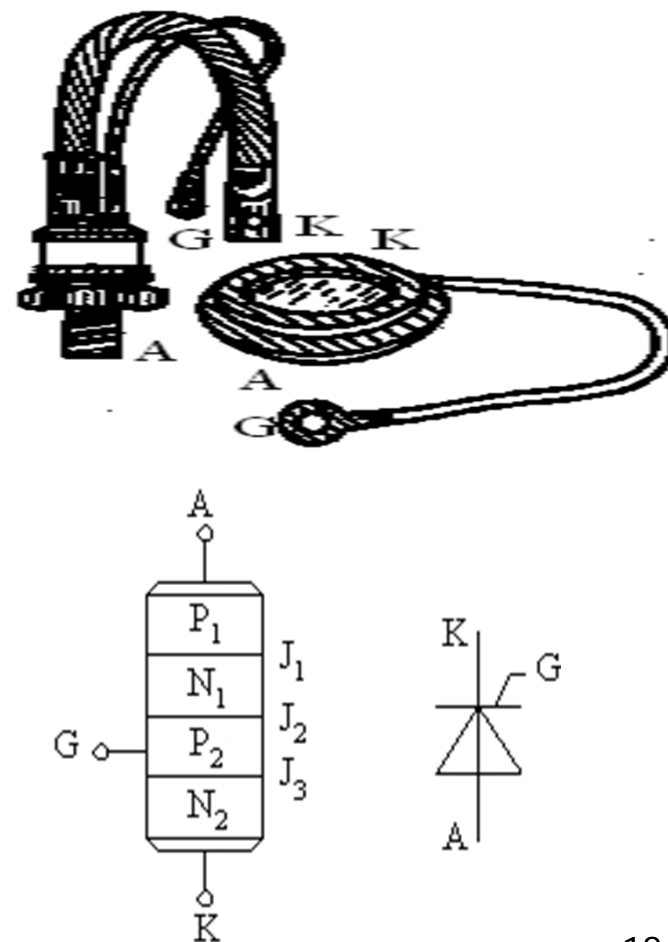
- 1956年美国贝尔实验室发明了晶闸管。
- 1957年美国通用电气公司开发出了世界上第一只晶闸管产品。
- 1958年商业化。开辟了电力电子技术迅速发展和广泛应用的崭新时代。
- 承受的电压和电流容量是电力电子器件中最高的，工作可靠，在大容量的应用场合具有重要的地位。

常用晶闸管的结构

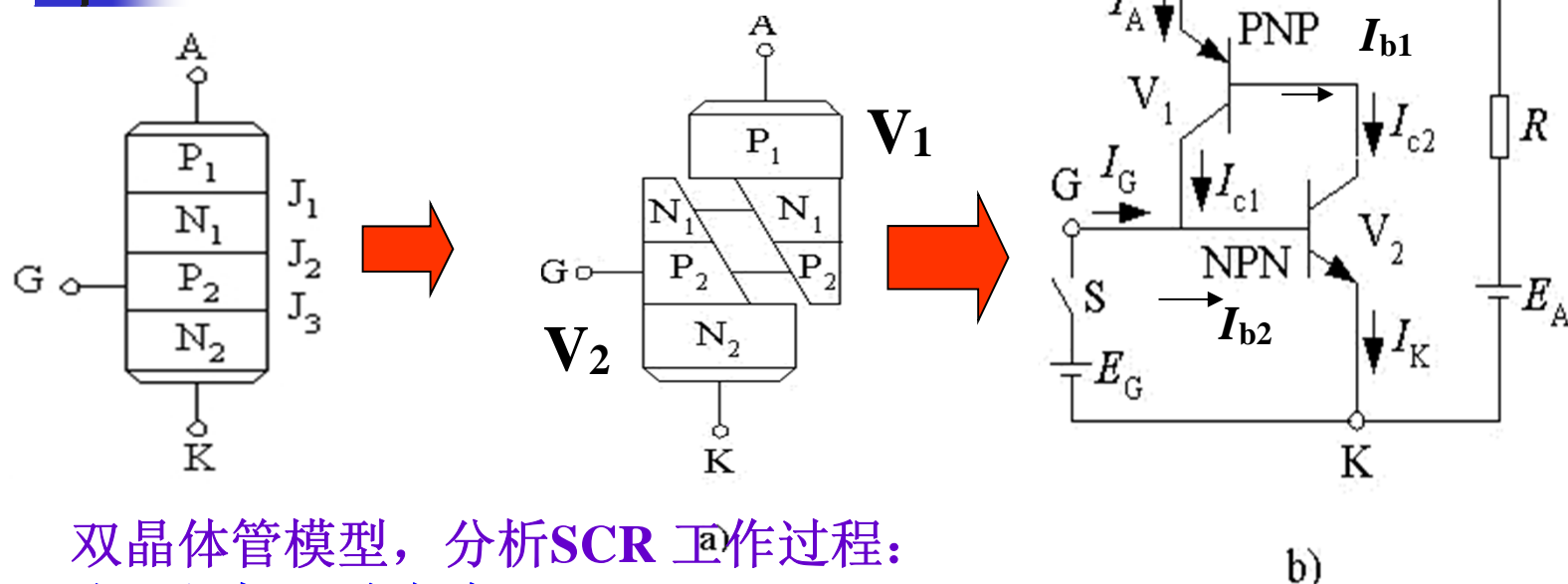


2.3.1 晶闸管的结构与工作原理

- 晶闸管的结构
- ◆ 外形上，主要有螺栓型、平板型、模块式等多种封装结构。
- ◆ 内部是PNPN四层半导体结构。J1、J2、J3三个PN结
- ◆ 引出阳极A、阴极K和门极（控制端）G三个联接端。



晶闸管的工作原理



双晶体管模型，分析SCR 工作过程：

注入门极驱动电流 I_G 。

V_1 、 V_2 形成强烈的正反馈。

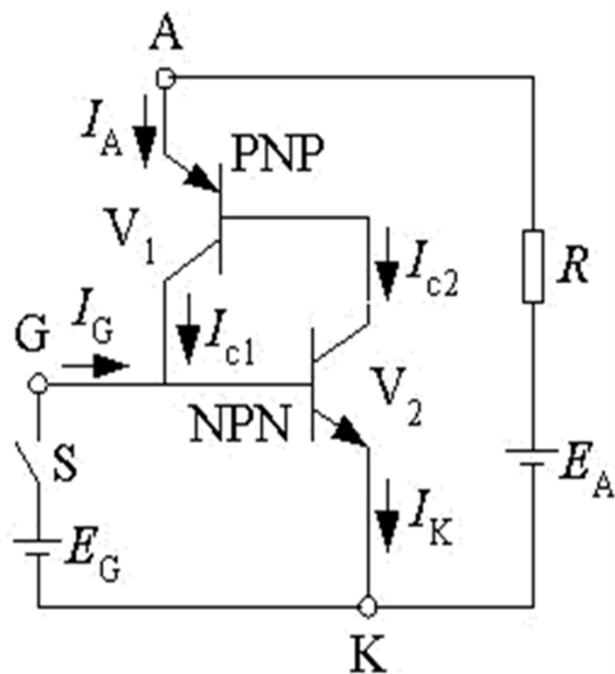
V_1 、 V_2 三极管进入饱和状态，SCR导通。

撤掉门极电流 I_G ，维持导通状态。

不能用驱动电流控制SCR关断，**半控型器件**。

SCR的驱动过程也称触发， I_G 称触发电流，驱动电路称门极触发电路。

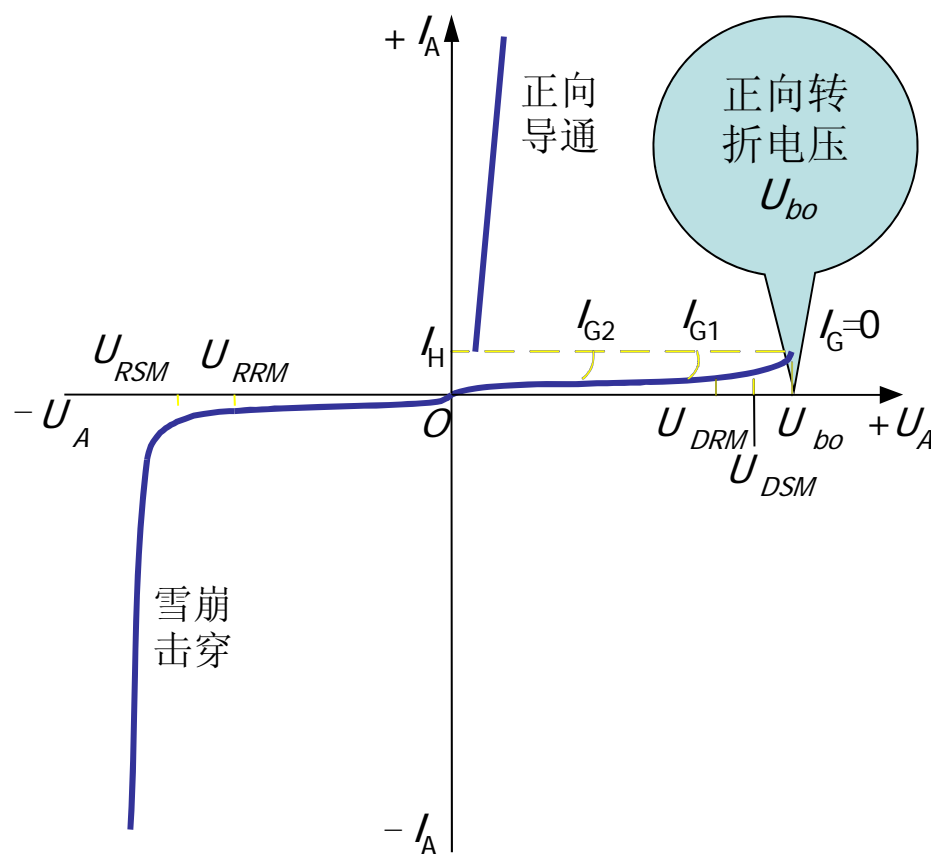
晶闸管正常工作时的特性：



- $U_{AK} < 0$, SCR处于阻断状态, 与 I_G 无关。
- $U_{AK} > 0$, $I_G = 0$, SCR处于阻断状态。
- $U_{AK} > 0$, 且 $I_G > 0$, SCR才能导通。
- SCR导通后, 门极失去控制作用, SCR保持导通状态。
- 导通后, 电流 I_A 由外电路决定。
- SCR的电流降到接近于零的某一数值以下 ($I_A < I_H$) 可关断。实现方法:
 $U_{AK} = 0$ 或 $U_{AK} < 0$ 。

2.3.2 晶闸管的基本特性

(1) 静态特性



◆ 晶闸管的伏安特性

正向特性

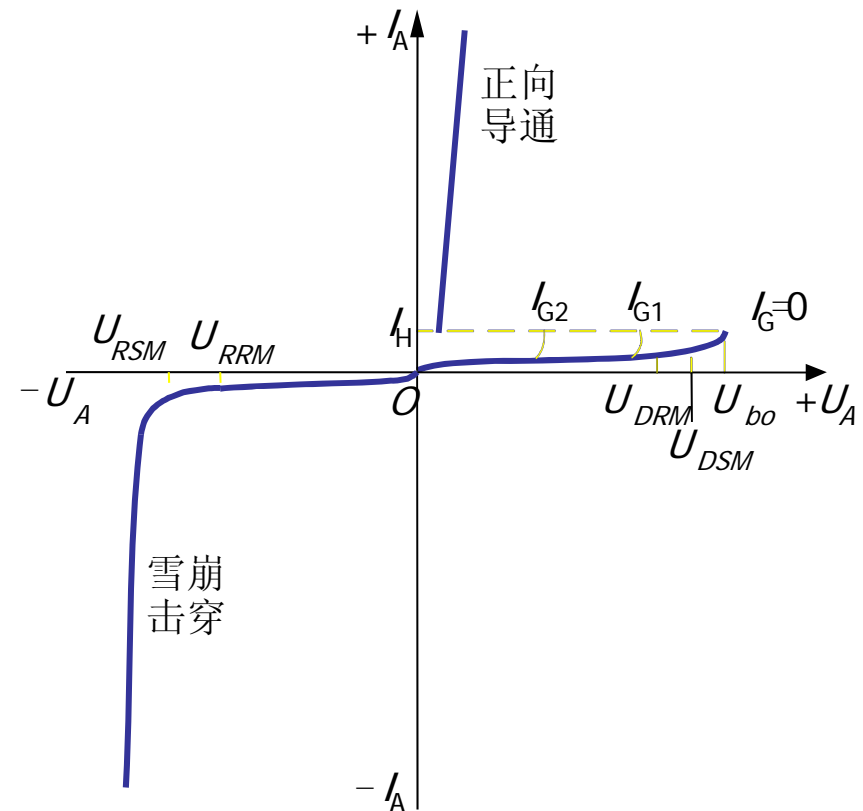
- $I_G=0$ 时，器件两端施加正向电压，只有很小的正向漏电流，SCR处于正向**阻断状态**。
- 正向电压超过**正向转折电压** U_{bo} ，则漏电流急剧增大，器件**开通**。
- 随着**门极电流幅值**的增大，**正向转折电压**降低。
- SCR本身的压降在**1V**左右。
- $I_G=0$ ， I_A 降至接近于零的某一数值 I_H (**维持电流**) 以下，则SCR又回到**正向阻断状态**。

反向特性

其伏安特性类似二极管的反向特性。

SCR处于反向阻断状态时，只有极小的反向漏电流通过。

当反向电压达到反向击穿电压后，反向漏电流急剧增大，可能导致**SCR**发热损坏。



(2) 动态特性

◆ 开通过程

☞ **SCR**内部的**正反馈**过程，**外电路电感**的限制，使**SCR**被触发后，阳极电流的增长需要一定的时间。

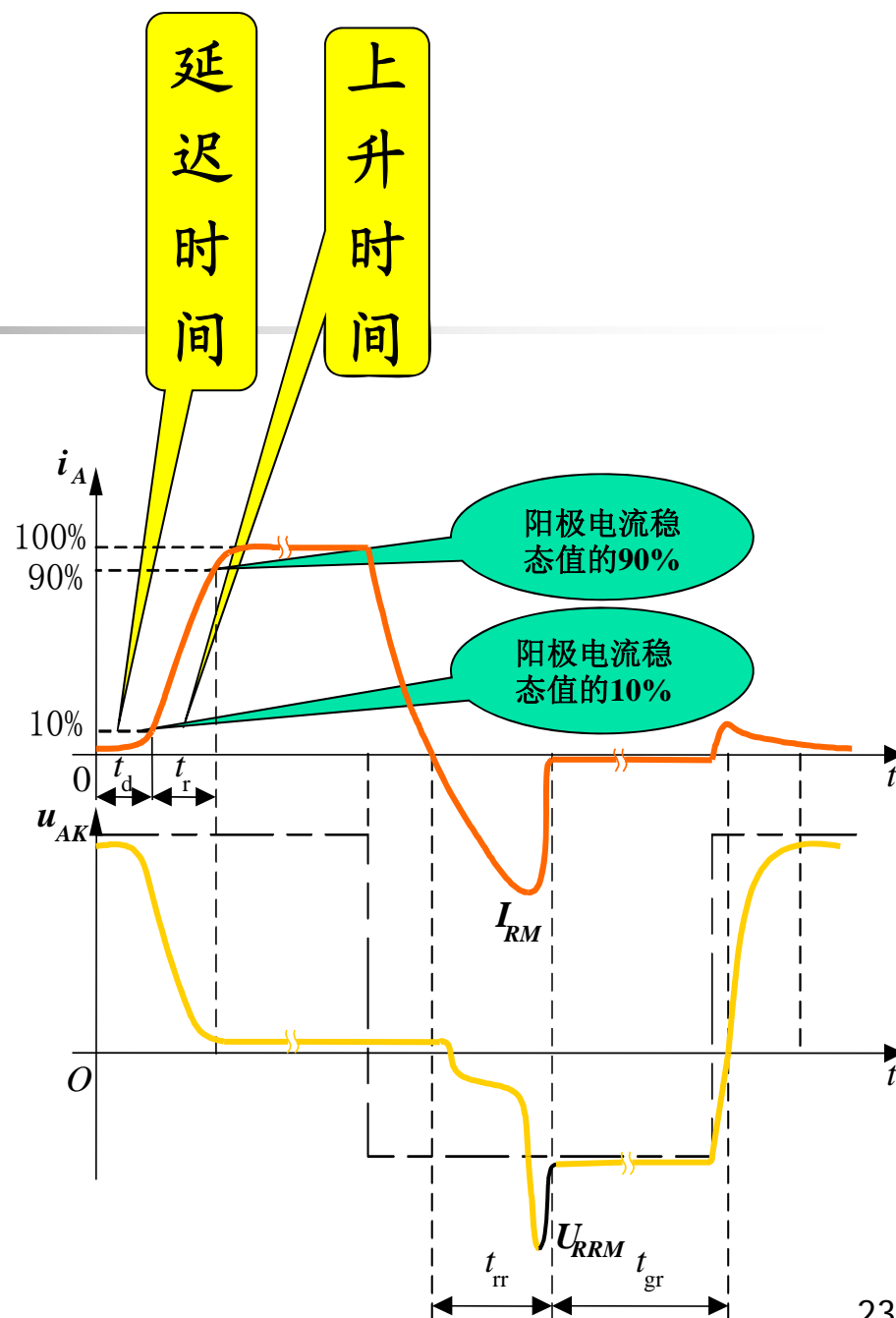
☞ **延迟时间** t_d ($0.5 \sim 1.5 \mu\text{s}$)

上升时间 t_r ($0.5 \sim 3 \mu\text{s}$)

开通时间 $t_{gt} = t_d + t_r$

☞ 延迟时间随门极电流的增大而减小，上升时间受**SCR**本身特性和外电路电感的影响。

☞ 提高阳极电压，可缩短延迟时间和上升时间。



关断过程

外电路电感的影响，SCR 上的外加电压突然由正向变为反向时，其阳极电流在衰减时必然有过渡过程。经过两个阶段：

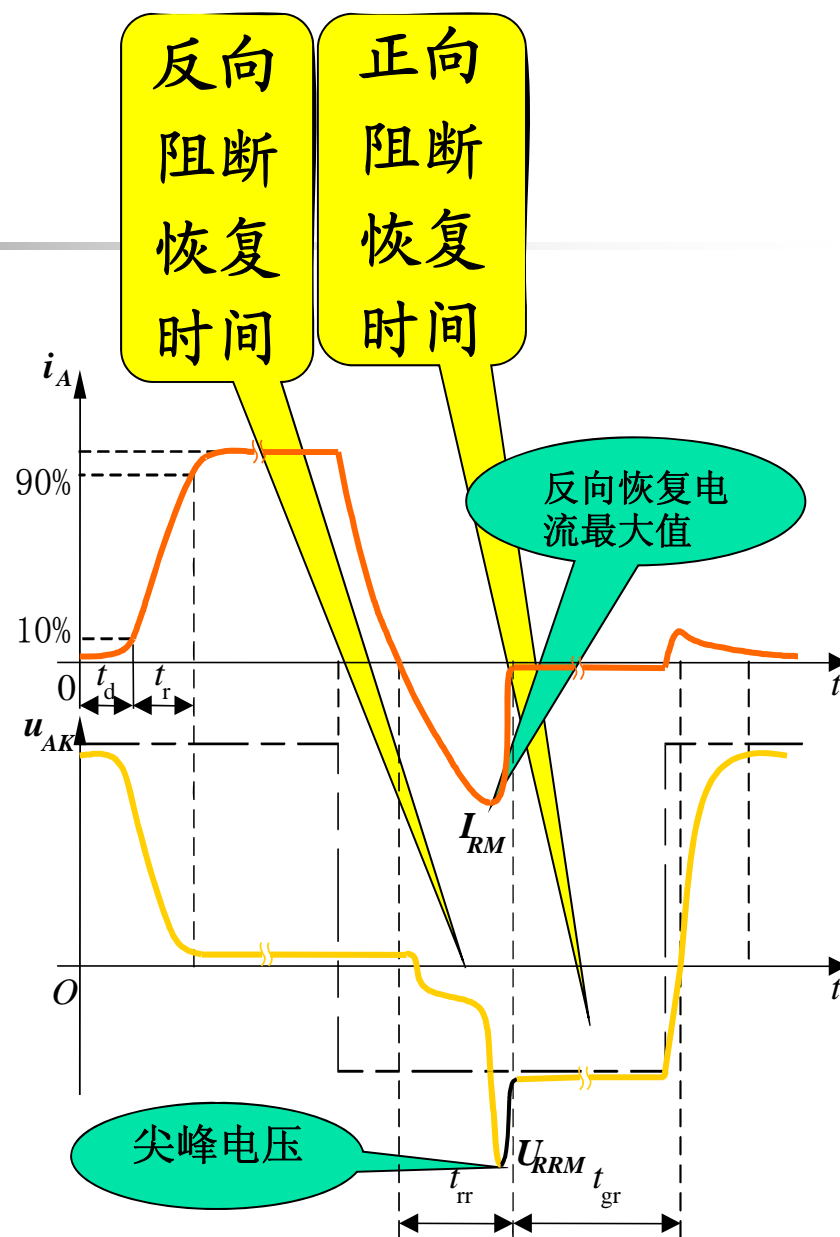
反向阻断恢复时间 t_{rr}

正向阻断恢复时间 t_{gr}

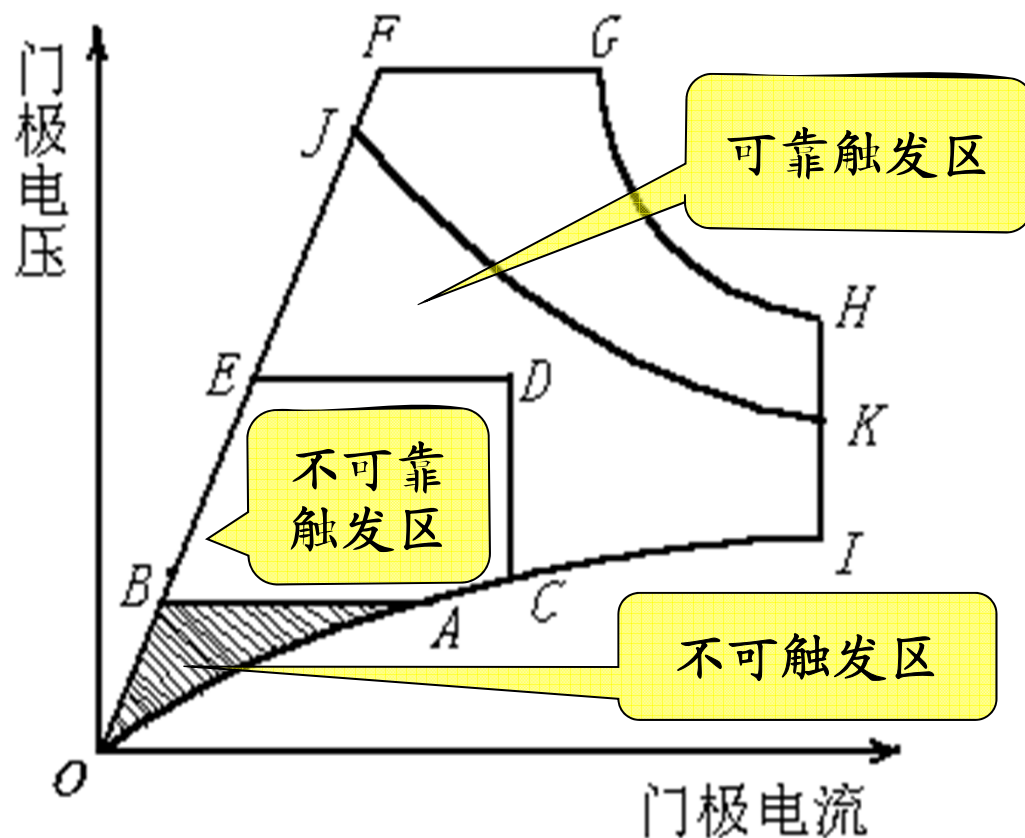
关断时间 $t_q = t_{rr} + t_{gr}$

关断时间约几百微秒。

正向阻断恢复时间内对 SCR 施加正向电压，会重新正向导通，不是受门极电流控制而导通的。



(3) 门极伏安特性



- ◆ 门极和阴极之间PN结的伏安特性
 - 制造过程的分散性。
 - 高阻特性、低阻特性为边界，划定的一个区域。
 - 分为三个区。
 - 触发电流和电压大于门极最大触发电流和电压。
 - 小于门极峰值电压、峰值电流和峰值功率。

2.3.3 晶闸管的主要参数

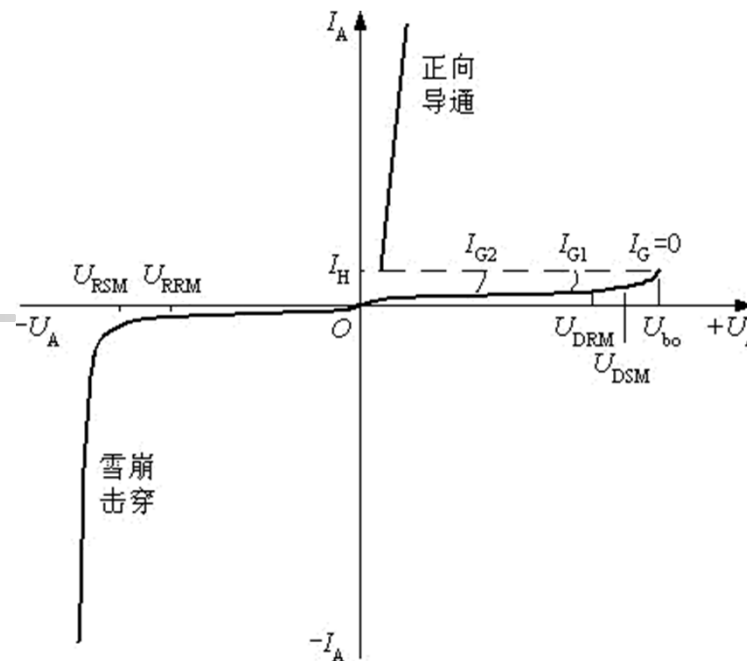
(1) 电压定额

1) 断态重复峰值电压 U_{DRM}

- 门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的正向峰值电压。
- 国标规定：重复频率50Hz，每次持续时间不超过10ms。为断态不重复峰值电压 U_{DSM} 的90%。
- 断态不重复峰值电压应低于正向转折电压 U_{bo} 。

2) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

- 门极断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。
- 为反向不重复峰值电压 U_{RSM} 的90%。
- 反向不重复峰值电压应低于反向击穿电压。



额定电压:

U_{DRM} 与 U_{RRM} 中较小值。一般选用正常工作时SCR所承受峰值电压2~3倍为额定电压。

3) 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。

(2) 电流定额

1) 通态平均电流 $I_{T(AV)}$

在环境温度40度和规定的冷却状态下，稳定结温不超过额定结温时所允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。

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。

使用时，其通态平均电流为 按发热效应相等原则（即有效值相等） 所得计算结果的1.5~2倍。

计算方法同电力二极管的 $I_{F(AV)}$ 。

2) 维持电流 I_H

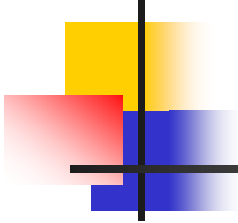
SCR导通后，维持导通所必需的最小电流。一般为几十到几百毫安。

3) 擎住电流 I_L

SCR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。约为 I_H 的2~4倍

4) 浪涌电流 I_{TSM}

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。



(3) 动态参数

1) 开通时间 t_{gt}

2) 关断时间 t_q

3) 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SCR从断态到通态转换的**外加电压最大上升率**。

电压上升率超过该临界值，就会使晶闸管误导通。

4) 通态电流临界上升率 di/dt

在规定的条件下，SCR能承受而无有害影响的**最大通态电流上升率**。

如果电流上升率超过该临界值，可能造成局部过热而使晶闸管损坏

2.4 典型全控型器件

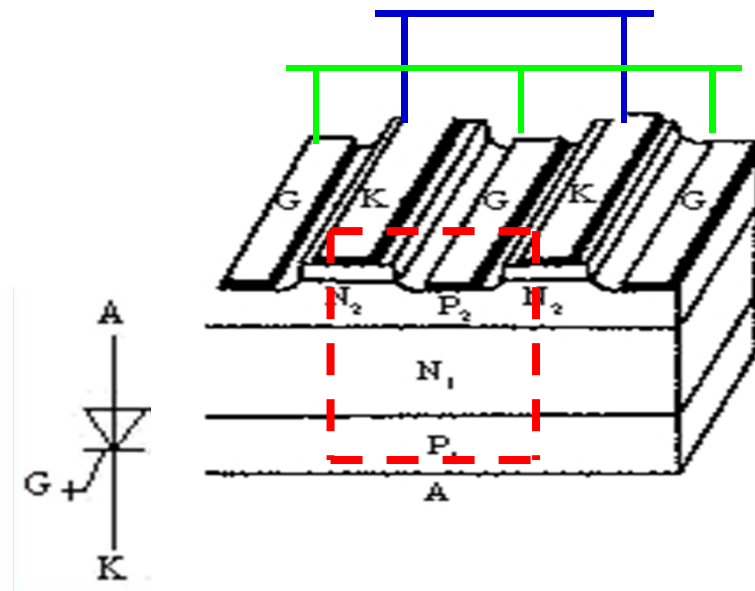
2.4.1 门极可关断晶闸管GTO

- SCR的一种派生器件。
- 可以通过在门极施加负的脉冲电流使其关断(全控型器件)。
- 电压电流容量较大与普通SCR接近因而在兆瓦级以上的大功率场合仍有较多的应用。

1) GTO的结构和工作原理

- 与普通SCR相同点：PNPN四层半导体，外部引出阳极A、阴极K和门极G。
- 与普通SCR不同点：一种多元的功率集成器件。

电气符号



工作原理:

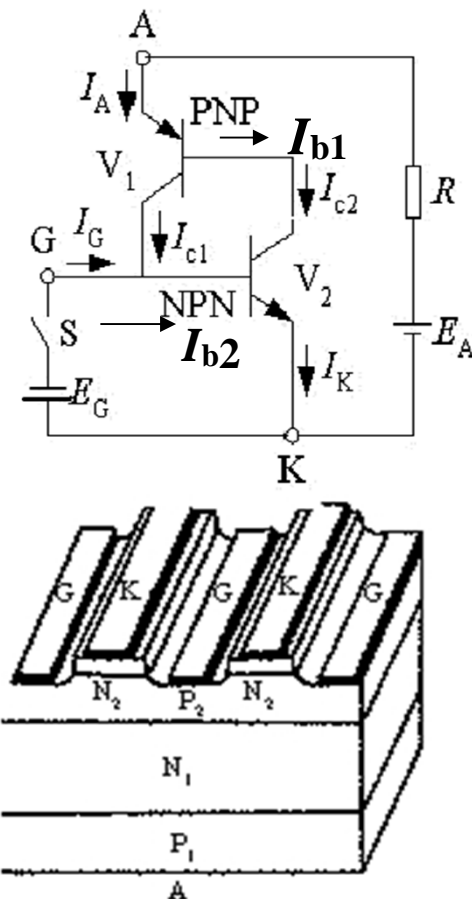
与普通**SCR**一样，可用双晶体管模型来分析

导通过程：与普通**SCR**相同。

关断过程：给门极加负脉冲，使电流 I_A 减小至**GTO**退出饱和和关断的正反馈过程。

与普通**SCR**的不同:

- 在设计上：**NPN**管易控制，易关断。
- 饱和程度：导通时接近于临界饱和，有利门极控制关断，但导通时管压降增大。
- 多元集成结构：门极**P2**与阴极间的距离短，易从门极抽出较大电流。



2) GTO的基本特性

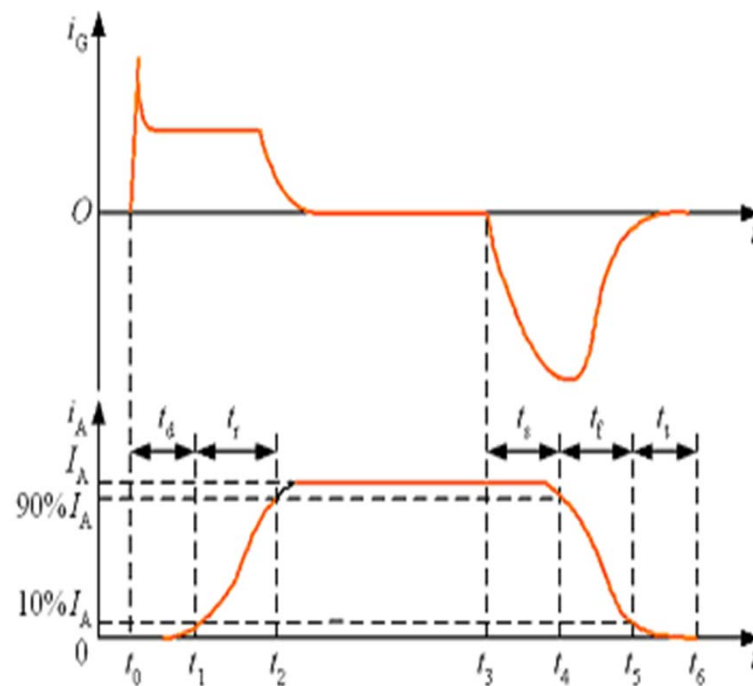
静态特性：与普通SCR相似。

动态特性：

开通过程：与普通SCR相似，要经历延迟时间 t_d 和上升时间 t_r 。

关断过程：与普通SCR不同，经历

- 1) 储存时间 t_s ：抽取饱和导通时存储的载流子，开始退出饱和区。
 - 2) 下降时间 t_f ：等效晶体管从饱和区退至放大区，阳极电流逐渐减小。
 - 3) 尾部时间 t_t ：残余载流子复活需要的时间。
- 通常 t_f 比 t_s 小得多，而 t_t 比 t_s 要长。
 - 门极负脉冲电流幅值越大，前沿越陡， t_s 就越短。
 - 门极负脉冲的后沿缓慢衰减，在 t_t 阶段保持适当的负电压，可缩短尾部时间。



3) GTO的主要参数

◆ GTO的许多参数都和普通晶闸管相应的参数意义相同。

1) 最大可关断阳极电流 I_{ATO} :

标称GTO额定电流。

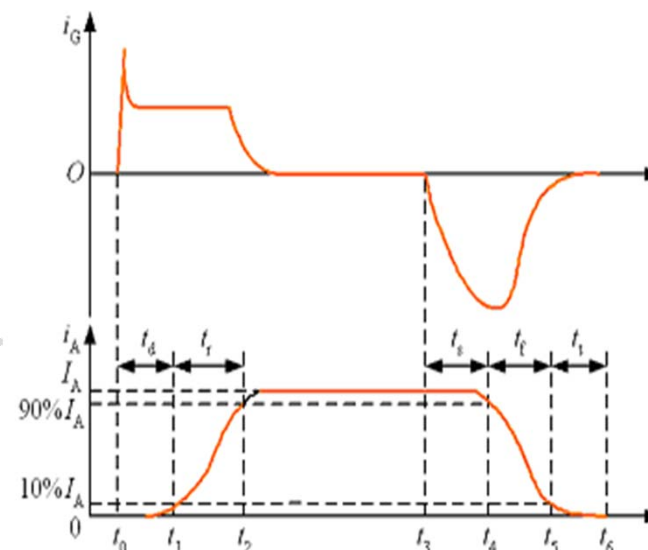
2) 电流关断增益 β_{off} :

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。

主要缺点: β_{off} 一般很小, 只有5左右。

3) 开通时间 t_{on} : 延迟时间 t_d 和上升时间 t_r 之和。延迟时间一般约 $1 \sim 2 \mu s$, 上升时间则随通态阳极电流值的增大而增大。

4) 关断时间 t_{off} : 储存时间 t_s 和下降时间 t_f 之和。而不包括尾部时间。储存时间随阳极电流的增大而增大, 下降时间一般小于 $2 \mu s$ 。





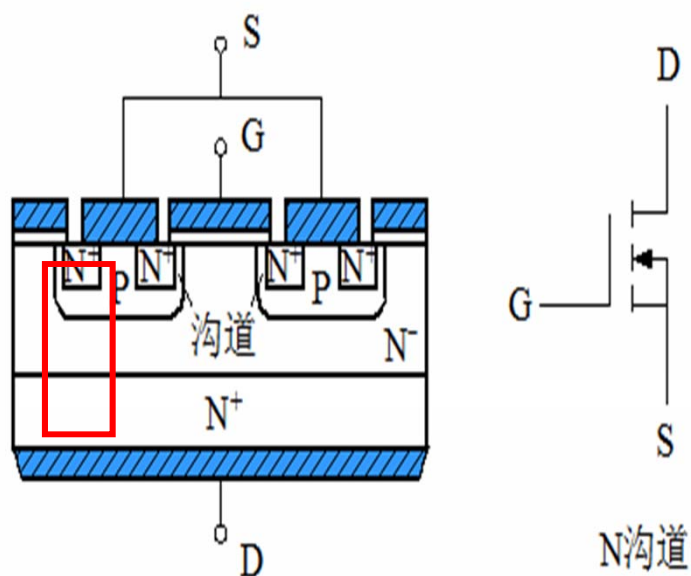
2.4.3 电力场效应晶体管 (Power MOSFET)

- 分为结型和绝缘栅型，通常主要指绝缘栅型中的MOS型FET,简称电力MOSFET。
- 电力MOSFET是用栅极电压来控制漏极电流的，特点有：
 - ◆ 驱动电路简单，需要的驱动功率小。
 - ◆ 开关速度快，工作频率高。
 - ◆ 热稳定性优于GTR。
 - ◆ 电流容量小，耐压低，多用于功率不超过10kW的电力电子装置。

1) 电力MOSFET结构和工作原理

◆ 电力MOSFET主要是N沟道增强型。

◆ 电力MOSFET的结构



➤ 单极型晶体管。

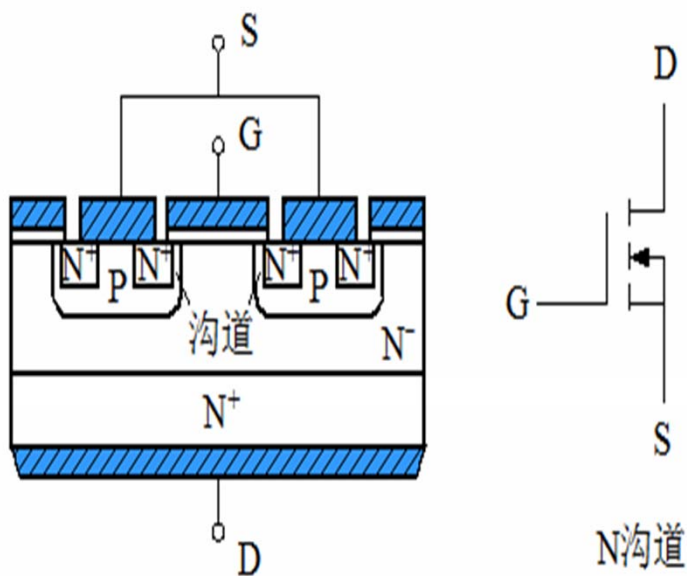
➤ 结构上与小功率MOS管有较大区别，采用了垂直导电结构，提高了器件的耐压和耐电流能力。

➤ 多元集成结构。

漏极D、源极S，栅极G。

电气图形符号。

◆ 电力MOSFET的工作原理



结构上，漏极和源极之间形成了寄生二极管。

■ 截止： $U_{DS} > 0$ ， $U_{GS} = 0$ 时，PN结 J_1 反偏，漏源极之间无电流流过。

■ 导通：

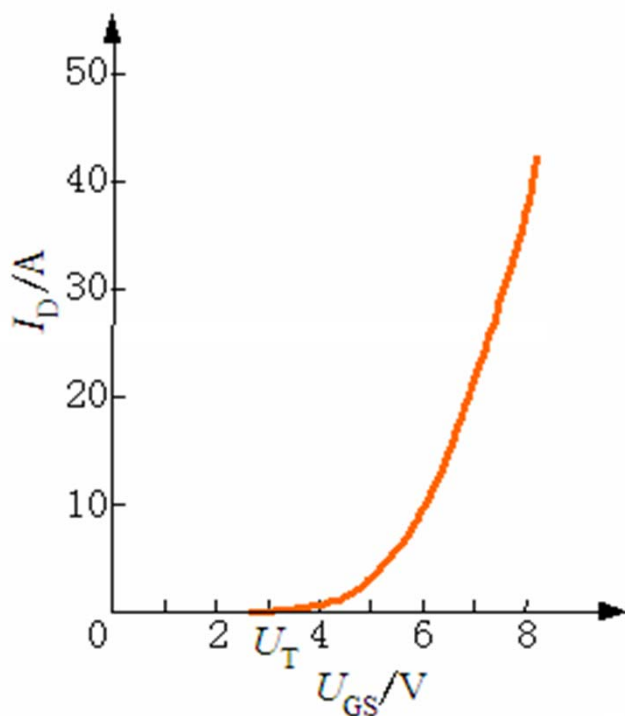
➤ 电压 $U_{GS} > 0$ ，将其下面P区中的空穴推开，电子(少子)吸引到栅极下面的P区表面。

➤ $U_{GS} > U_T$ ，使P型半导体反型成N型半导体，该反型层形成N沟道，使 J_1 消失，漏极和源极导电。

➤ U_T 称为开启电压（或阈值电压）， U_{GS} 超过 U_T 越多，导电能力越强，漏极电流 I_D 越大。

2) 电力MOSFET的基本特性

(1) 静态特性

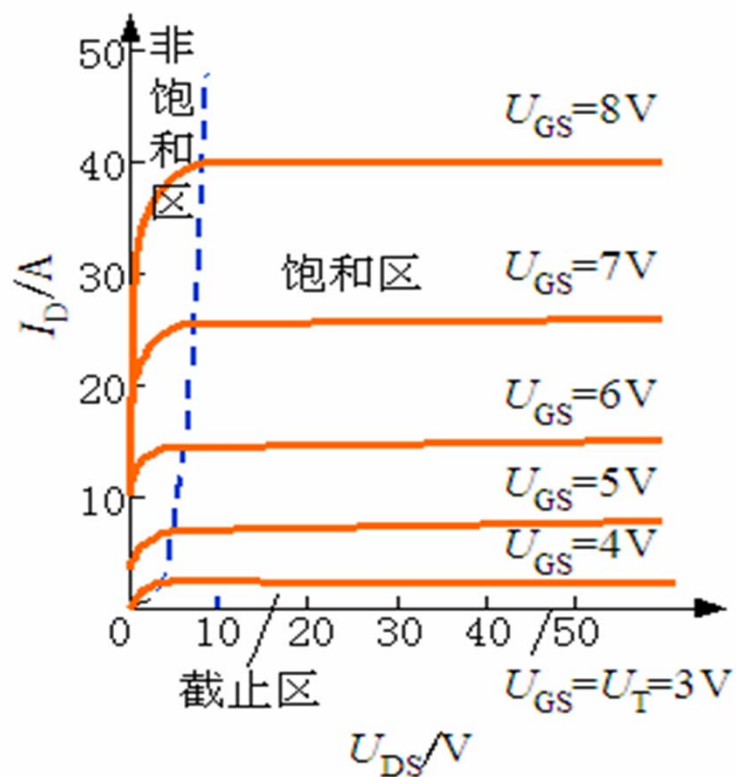


转移特性:

- 指漏极电流 I_D 和栅源间电压 U_{GS} 的关系。
- 反映了输入电压和输出电流的关系 (U_{GS} 对 I_D 的控制作用)。
- I_D 较大时, I_D 与 U_{GS} 的关系近似线性, 曲线的斜率被定义为跨导 G_{fs} , 即 $G_{fs} = dI_D / dU_{GS}$ 。
- 电压控制型器件, 输入电流非常小, 其输入阻抗极高。
- 开启电压 U_T : 2~3V, U_{GS} 小于 U_T 时器件截止。

输出特性:

MOSFET的漏极伏安特性。

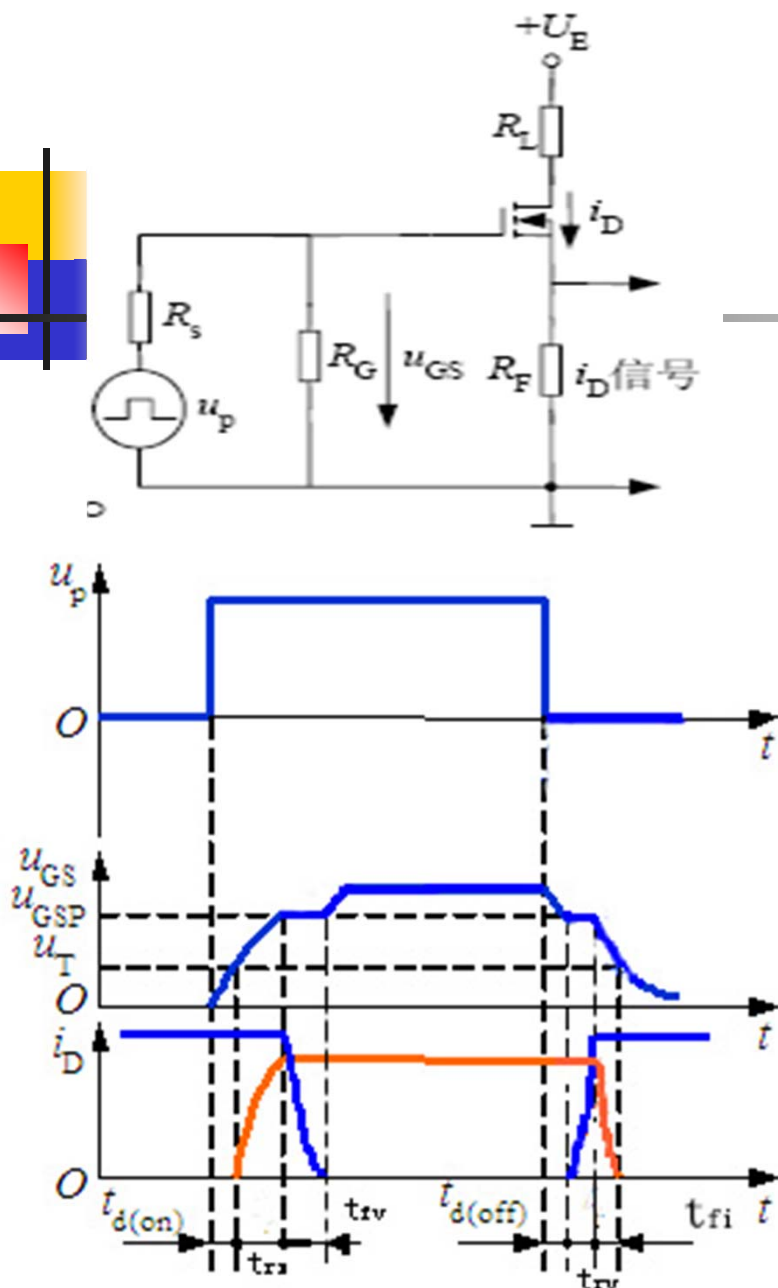
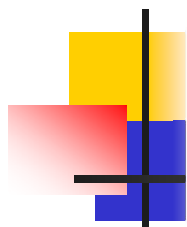


分为三个区域: 截止区、饱和区、非饱和区。

开关状态: 截止区、非饱和区之间来回转换。

通态电阻: 正温度系数, 对器件并联时的均流有利。

$U_{GS} > 10V$



(2) 动态特性

◆开通过程，经历：

开通延迟时间 $t_{d(on)}$

电流上升时间 t_{ri}

电压下降时间 t_{fv}

开通时间 $t_{on} = t_{d(on)} + t_r + t_{fv}$

◆关断过程，经历：

关断延迟时间 $t_{d(off)}$

电压上升时间 t_{rv}

电流下降时间 t_{fi}

关断时间 $t_{off} = t_{d(off)} + t_{rv} + t_{fi}$

- 受输入电容的影响
- 与驱动电路的阻抗有关
- 开关时间：10~100ns，频率100kHz以上。
- 需一定的驱动功率，且随开关频率增加而增大。



3) 电力MOSFET的主要参数

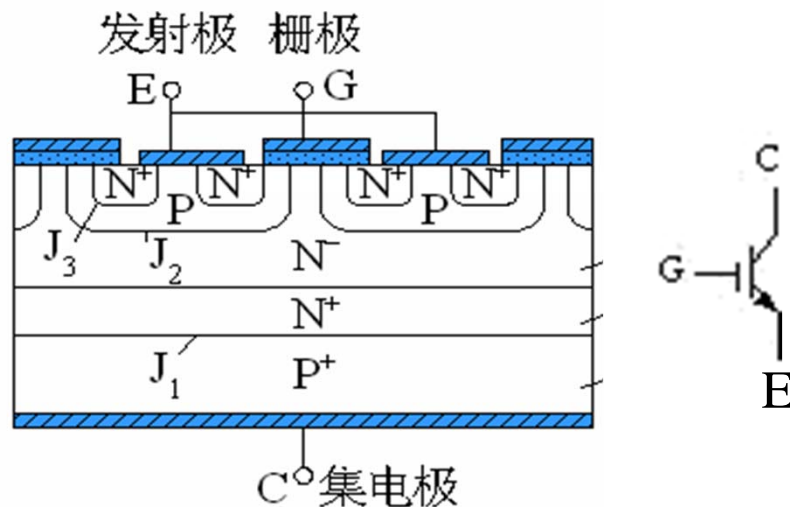
- 跨导 G_{fs} 、开启电压 U_T 以及开关过程中的各时间参数。
- 漏极电压 U_{DS} ：标称电力MOSFET电压定额的参数。
- 漏极直流电流 I_D 和漏极脉冲电流幅值 I_{DM} ：
标称电力MOSFET电流定额的参数。
- 栅源电压 U_{GS} ： $-20V < U_{GS} < +20V$ ，栅源之间的绝缘层很薄，注意静电。
- 极间电容： C_{GS} 、 C_{GD} 和 C_{DS} ，影响开关特性。
- 安全工作区：漏源间的耐压、漏极最大允许电流和最大耗散功率构成的区域。



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

- **GTO**和**GTR**特点：双极型、电流驱动，具有电导调制效应，通流能力很强，但开关速度较低，所需驱动功率大，驱动电路复杂。
- **MOSFET**特点：单极型、电压驱动，开关速度快，输入阻抗高，热稳定性好，所需驱动功率小，驱动电路简单。
- 两类器件取长补短结合而成的复合器件：**绝缘栅双极晶体管IGBT**。
- 综合了**GTR**和**MOSFET**的优点，具有良好的特性。
- 1986 年投入市场，是中小功率电力电子设备的主导器件。
- 继续提高电压和电流容量，以期取代GTO、SCR的地位。

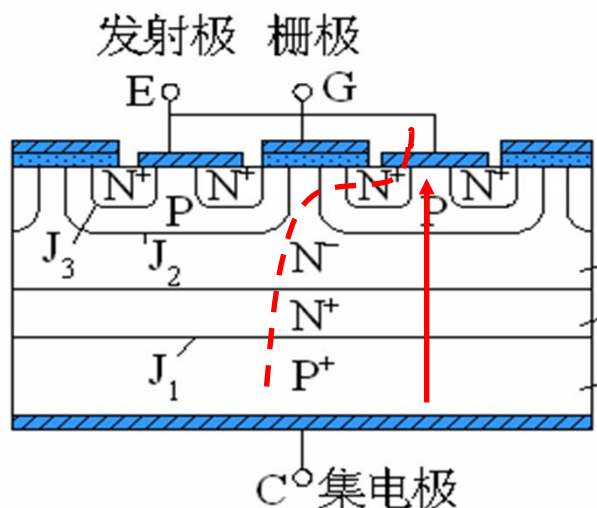
1) IGBT的结构和工作原理:



◆ IGBT的结构

- 由**MOSFET**与**GTR**组合而成的**IGBT**，在**MOSFET**的漏极侧加一层**P⁺**型半导体，使得**IGBT**具有很强的**通流**能力。
- **多元集成**结构。
- 三端器件，**栅极G**、**集电极C**和**发射极E**。
- 电气图形符号。

◆ IGBT的工作原理

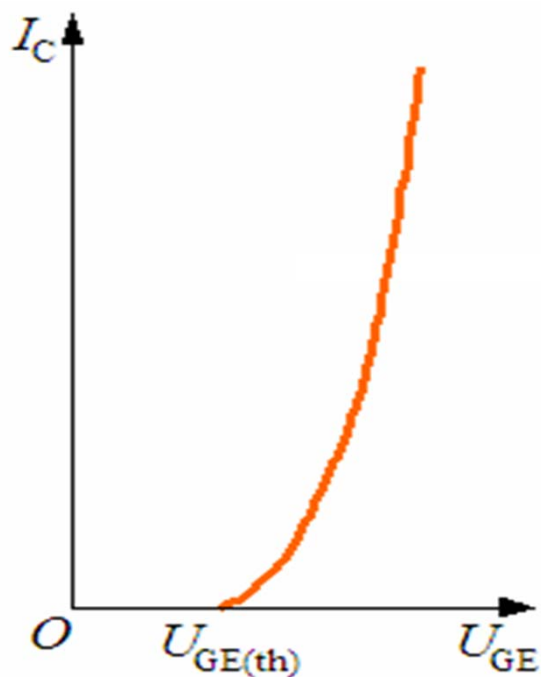


- IGBT的驱动原理与电力MOSFET基本相同，是一种场控器件。
- 通断由栅极和发射极间的电压 U_{GE} 决定。

导通： $U_{GE} >$ 开启电压 $U_{GE(th)}$ ，MOSFET内形成沟道，为晶体管提供基极电流，IGBT导通。

关断： 栅射极间施加反向电压或不加信号，MOSFET内的沟道消失，晶体管的基极电流被切断，IGBT关断。

2) IGBT的基本特性



(1) 静态特性

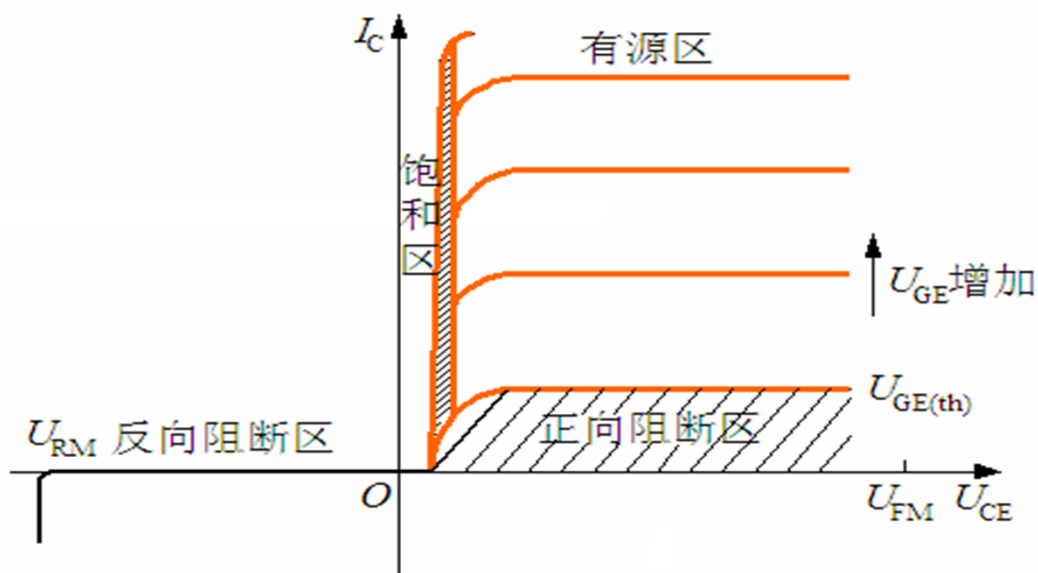
➤ 转移特性：描述的是集电极电流 I_C 与栅射电压 U_{GE} 之间的关系。

开启电压 $U_{GE(th)}$ ：2~6V

U_{GE} ：极限值为正负20V

工作最佳值为+15V

输出特性（伏安特性）

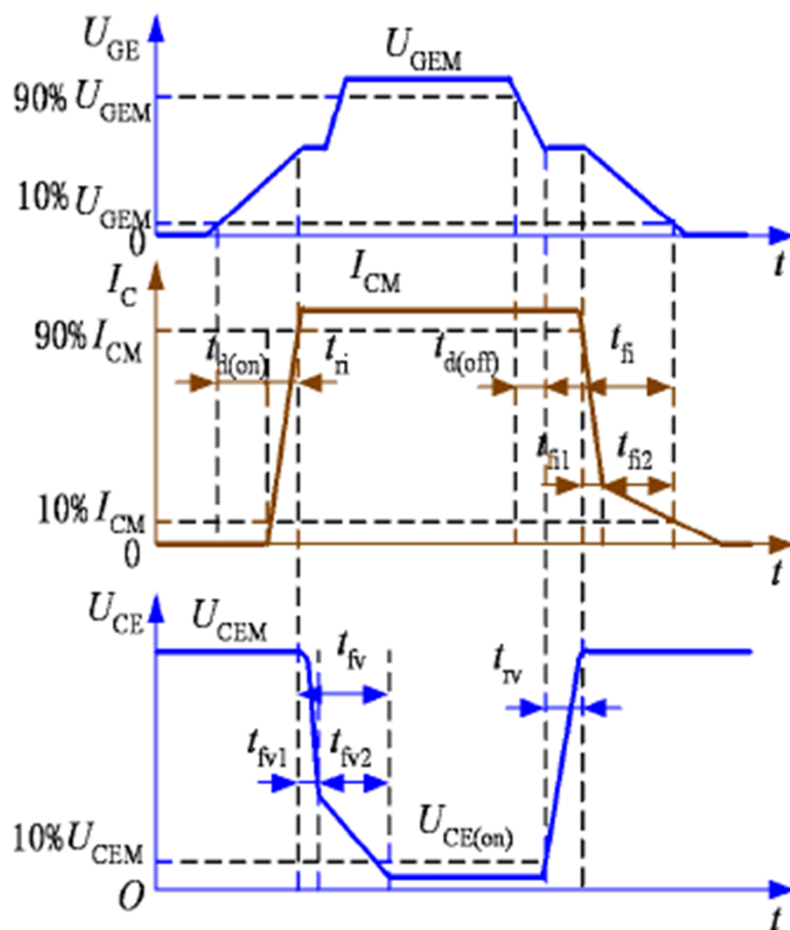


开关状态：正向阻断区（关断）、饱和区（导通）之间来回转换。

$U_{CE} < 0$ 时，为反向阻断工作状态

- 以栅射电压为参考变量时，集电极电流 I_C 与集射极间电压 U_{CE} 之间的关系。
- 三个区域：正向阻断区、有源区和饱和区。

(2) 动态特性



开通过程:

内部MOSFET运行控制PNP管饱和和导通。经历:

- 开通延迟时间 $t_{d(on)}$
- 电流上升时间 t_r
- 电压下降时间 t_{fv} , 分为 t_{fv1} 和 t_{fv2} 两段。
- ◆ 开通时间 $t_{on} = t_{d(on)} + t_r + t_{fv}$

关断过程:

内部MOSFET运行控制PNP管退饱和和关断。经历:

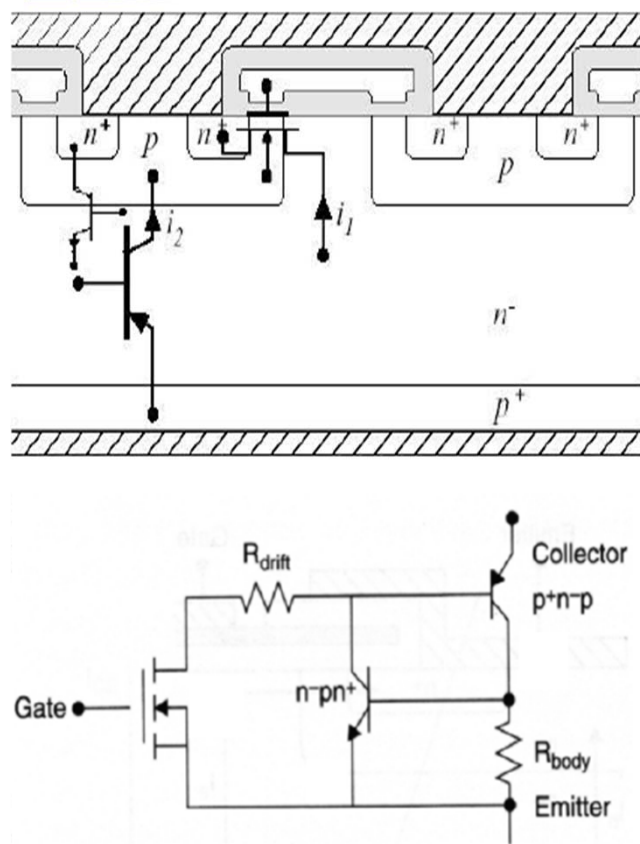
- 关断延迟时间 $t_{d(off)}$
- 电压上升时间 t_{rv}
- 电流下降时间 t_{fi} , 分为 t_{fi1} 和 t_{fi2} 两段。
- ◆ 关断时间 $t_{off} = t_{d(off)} + t_{rv} + t_{fi}$



3) IGBT的主要参数

- ◆ 前面提到的各参数。
- ◆ 最大集射极间电压 U_{CES}
由内部的PNP晶体管的击穿电压确定。
- ◆ 最大集电极电流
包括额定直流电流 I_C 和1ms脉宽最大电流 I_{CP} 。
- ◆ 最大集电极功耗 P_{CM}
正常工作温度下允许的最大耗散功率。

4) IGBT的擎住效应和安全工作区



◆ IGBT的擎住效应

- **擎住效应**: 内部寄生一个由N-PN⁺和P⁺N-P晶体管组成的寄生SCR。由于P形体区的横向空穴电流会在NPN晶体管的基极与发射极之间存在体区短路电阻上产生压降, 即在J₃结施加一个正向偏压。一旦J₃开通, 出现栅极不能对I_C控制的现象。
- **原因**: 集电极电流过大 (静态擎住效应), dU_{CE}/dt 过大 (动态擎住效应), 或温度升高。
- 动态擎住效应比静态擎住效应所允许的集电极电流还要小, 最大I_C实际上是根据动态擎住效应而确定的。
- **预防措施**:



IGBT的安全工作区:

正向偏置安全工作区 (FBSOA) :

由最大集电极电流、最大集射极间电压 和最大集电极功耗确定

反向偏置安全工作区 (RBSOA) :

由最大集电极电流、最大集射极间电压 和最大允许电压上升率 dU_{CE}/dt 确定