

仅内部使用 郭小舟

电力电子技术

Power Electronics

西南交通大学



电力电子技术——使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术，即应用于电力领域的电子技术

电力电子器件制造技术（基础是半导体物理）

电力电子技术的基础

电力电子器件应用技术（变流技术）

用电力电子器件构成电力变换电路和对其进行控制的技术以及构成电力电子装置及系统的技术

电力电子技术的核心，理论基础是电路理论。



电力电子技术的任务

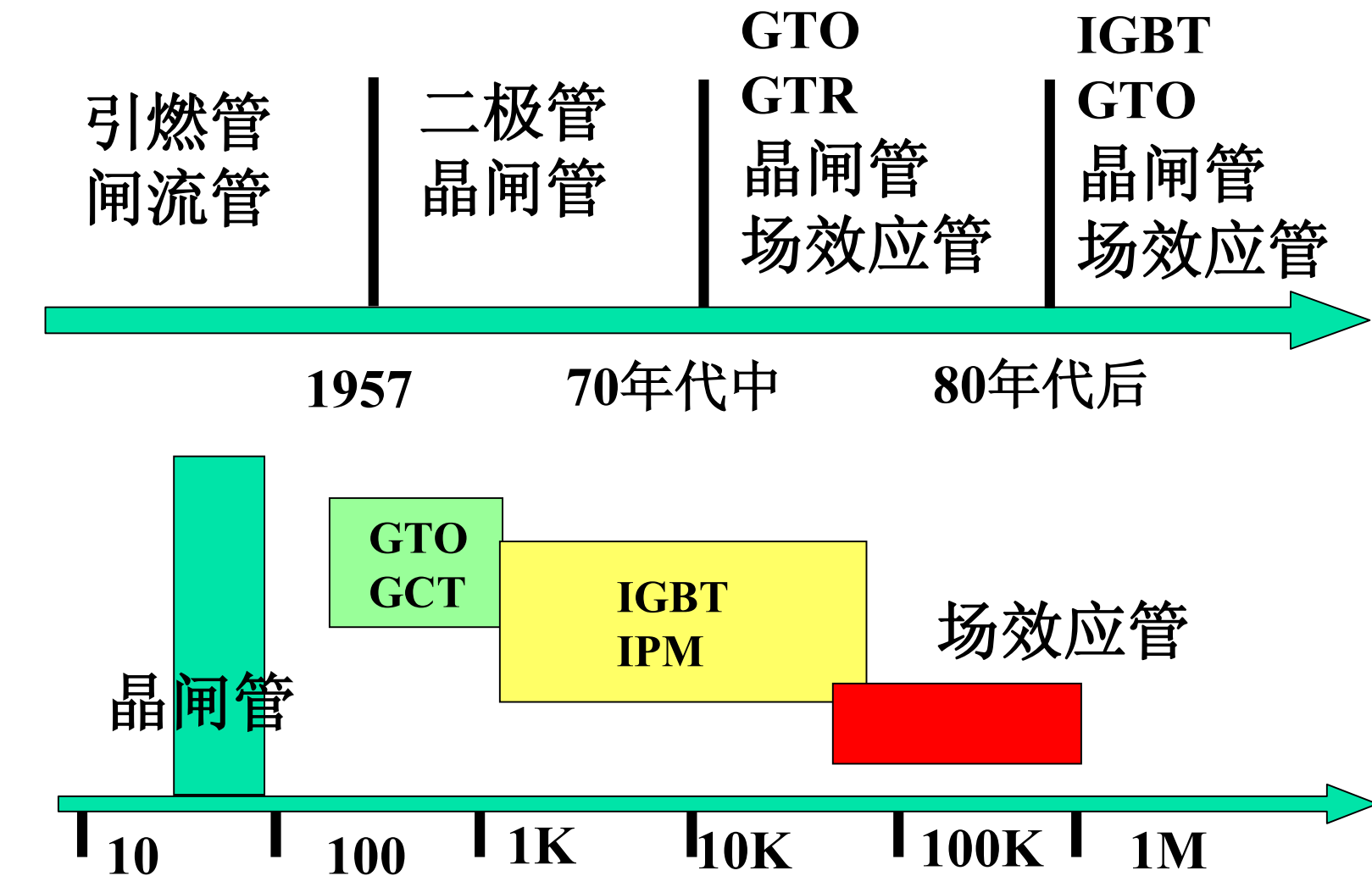
电能的变换：包括频率变换、幅值变换、相数变换、相位变换

常用的变换有：

- 交流到直流的变换—整流
- 直流到交流的变换—逆变
- 直流到直流的变换
- 交流到交流的变换



电力半导体开关的发展



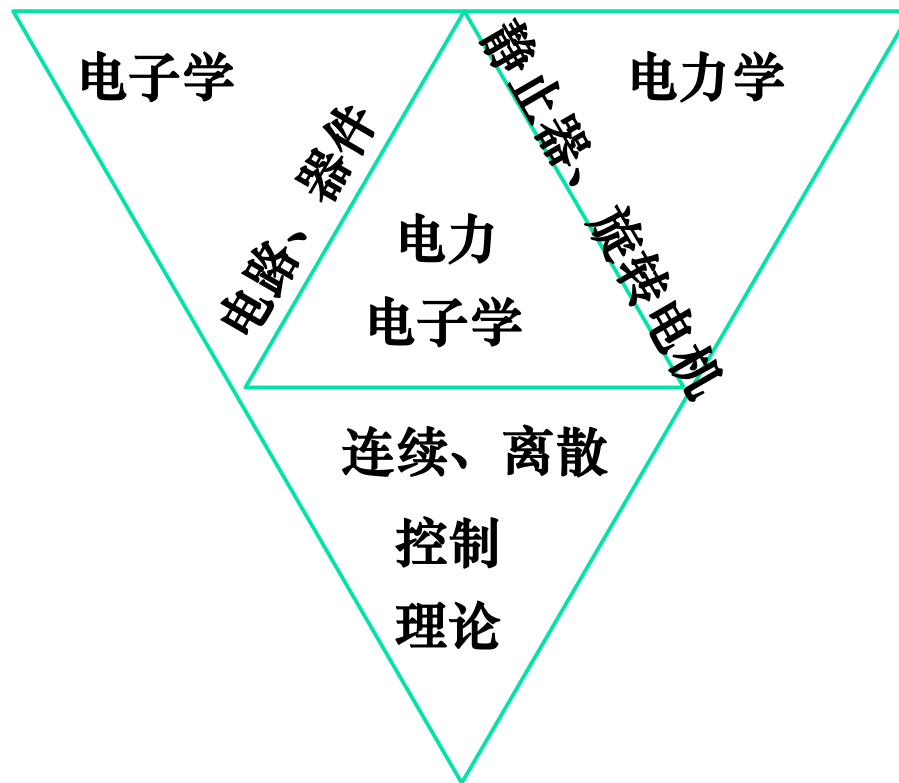
与相关学科的关系

电力电子学

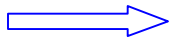
(Power Electronics)

名称60年代出现

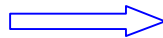
全世界普遍接受的对
电力电子学进行描
述的倒三角形



电路
电子技术基础



电力电
子技术



电力、拖动、
自动控制系统



电力电子技术的应用

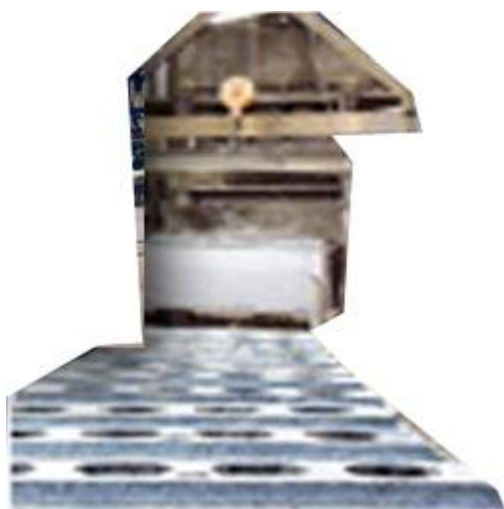
- **一般工业：**
交直流电机、电化学、冶金工业
- **交通运输：**
电气化铁道、电动汽车、航空、航海
- **电力系统：**
高压直流输电、柔性交流输电、无功补偿
- **电子装置电源：**
为信息电子装置提供动力
- **家用电器：**
“节能灯”、变频空调
- **其他：**
UPS、航天飞行器、新能源、发电装置



1) 一般工业



轧钢机



电解铝



数控机床



冶金工业

2) 交通运输



3) 电力系统

柔性交流输电FACTS



高压直流装置HVDC



SVC

4) 电子装置用电源



程控交换机



电子装置



微型计算机



5) 家用电器



6) 其他



大型计算机的UPS



航天技术



新型能源

第1章 电力电子器件

概述

电力电子技术是以电力半导体开关为基础的
理想的电力半导体开关的特点：

只有断态与通态两种状态，没有放大状态

导通时，器件两端电压为零

截止时，流过器件的电流为零

从导通到截止或从截止到导通所需要的时间为零

实际器件与理想器件有一定的差距，但可近似



电力电子器件的分类

按照器件能够被控制的程度分为

半控型器件（如Thyristor）

——通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断。

全控型器件（如IGBT,MOSFET）

——通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断，又称自关断器件。

不可控器件(如Power Diode)

——不能用控制信号来控制其通断，因此也就不需要驱动电路。



按照驱动电路信号的性质可分为

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。如晶闸管、GTO、GTR等

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。如IGBT等

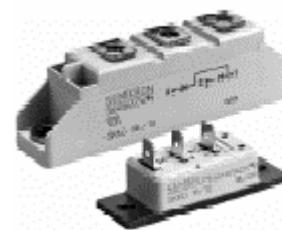
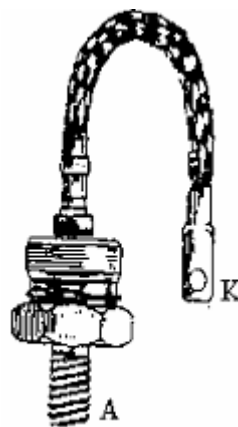
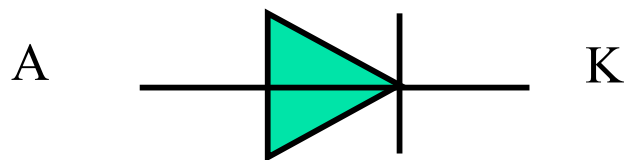
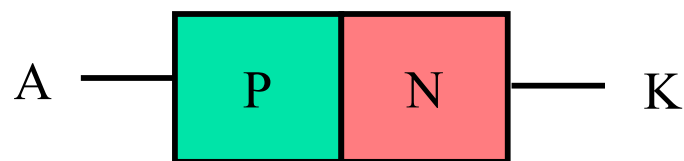
按器件内部参与导电的载流子分

单极型器件，如场效应管(一种)；双极型器件，如晶闸管(电子与空穴)；复合型器件，如IGBT

第一章 电力电子器件

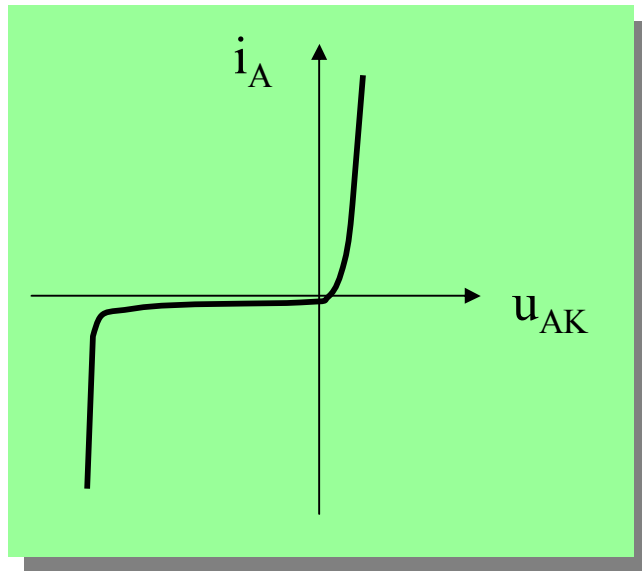
§ 1-1 功率二极管

1. 结构：由一个**PN**结构成。**A**-阳极，**K**-阴极

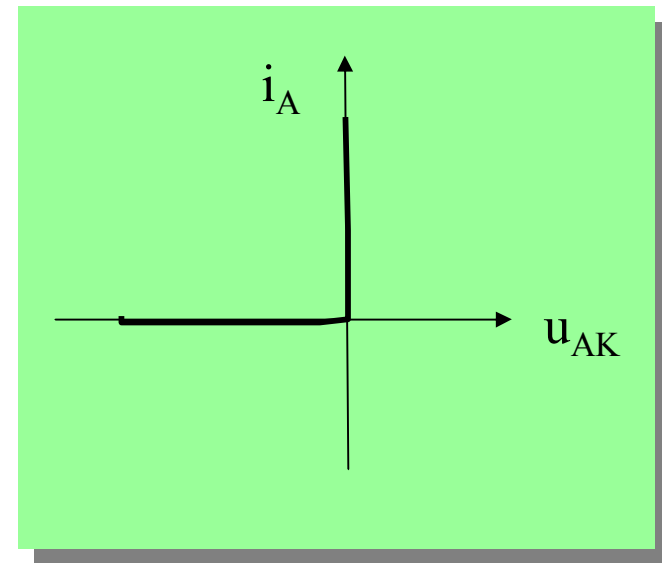


2. 特性

A 伏安特性： 阳极电流与阳-阴极电压间的关系



实际特性

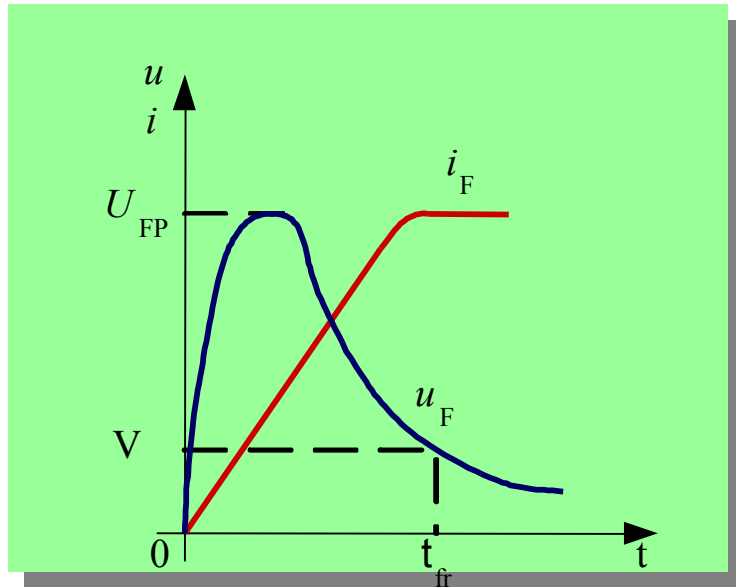


理想特性

二极管的正向电压降很小，在理论分析时可忽略不计。

B 二极管的开关特性

导通特性

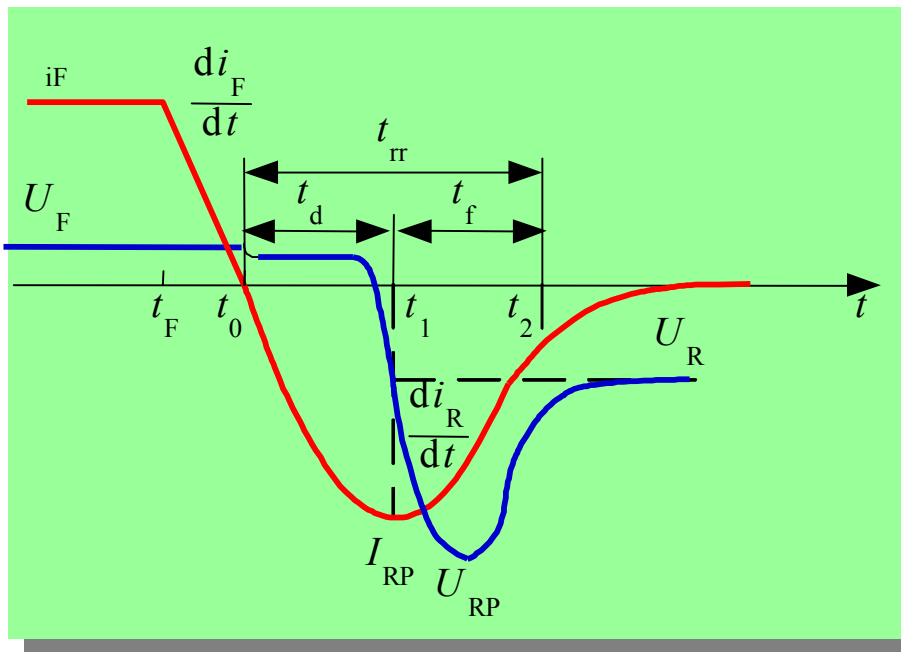


正向压降先出现一个过冲 U_{FP} ，经过一段时间后才趋于稳态压降值。

产生这一现象的原因是
载流子的分布与达到一定的浓度需要时间

在二极管获取超量存储电荷前，其体电阻率很大
电流上升率越大， U_{FP} 越高

关断特性



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。

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。

载流子的抽出需要时间；当PN结反向恢复时因引线电感而产生高的电压。

3. 二极管的主要参数

1) 正向平均电流 $I_{F(AV)}$

额定电流——在指定的管壳温度和散热条件下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，并应留有一定的裕量。

2) 正向压降 U_F

在规定结温下，流过指定的稳态正向电流时的正向管压降。



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，应当留有裕量

4) 反向恢复时间 t_{rr}

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

5) 最高工作结温 T_{JM}

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

6) 浪涌电流 I_{FSM}

指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



4. 二极管的主要类型

整流二极管：工作频率低于1KHz，容量大

快速恢复二极管：反向恢复过程短，工作频率高

肖特基二极管：反向恢复时间短，管压降小但电压低

其它：传感器（光敏、磁敏二极管）；

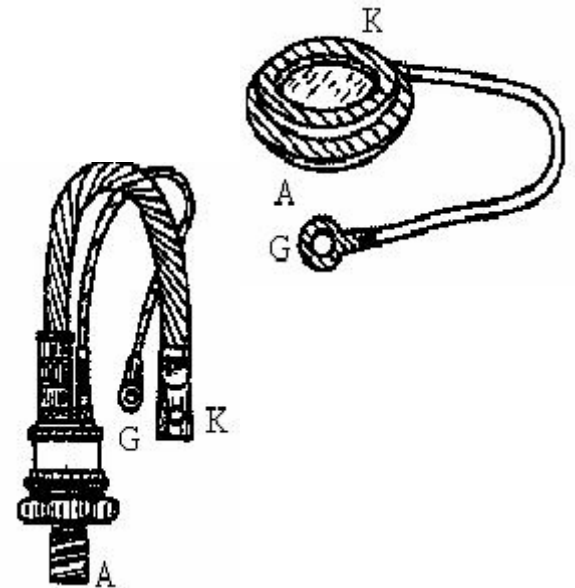
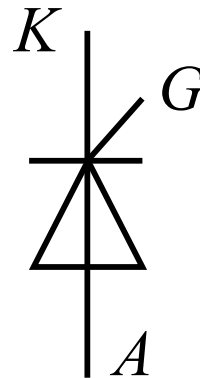
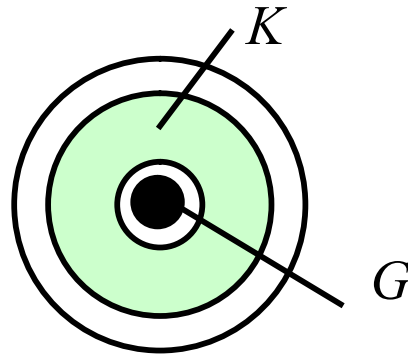
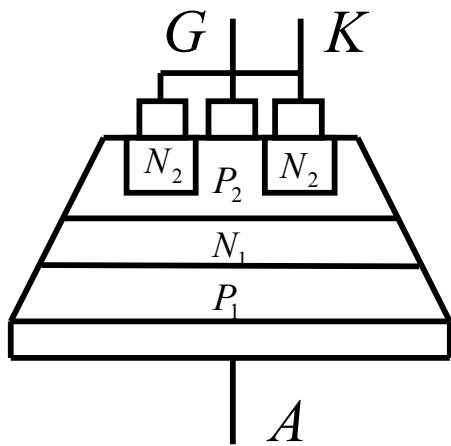
光源（红外、激光二极管）；

稳压（齐纳二极管、恒流二极管）

§ 1-2 普通晶闸管

1. 结构

由三个PN结构成，为四层三端结构。A-阳极，K-阴极， G-门极。





螺栓型晶闸管

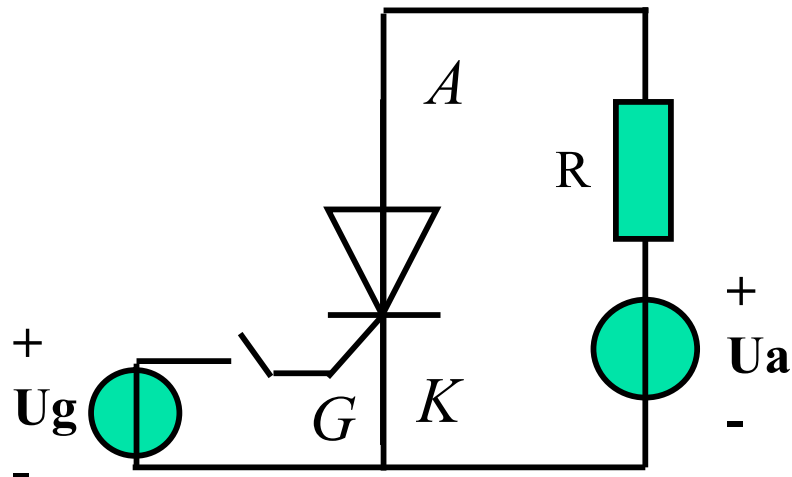


晶闸管模块

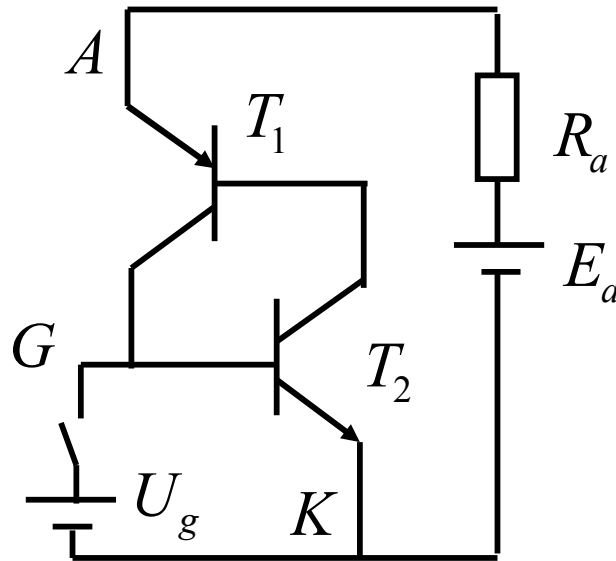
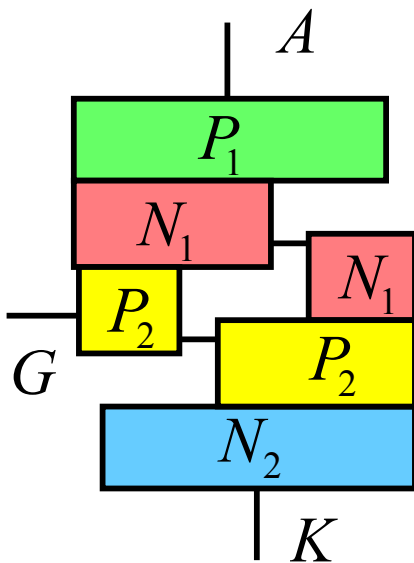


平板型晶闸管外形及结构

2. 双三极管理论：晶闸管 = 两个三极管的复合体



反偏时阻断，与
门极无关



正偏和有门极触
发电流时导通

触发导通

不能用门极电流
关断

晶闸管的特点：

承受反向电压时，不论门极是否有触发电流，晶闸管都不会导通

承受正向电压时，仅在门极有触发电流的情况下晶闸管才能开通

晶闸管一旦导通，门极就失去控制作用

要使晶闸管关断，只能使晶闸管的电流降到接近于零的某一数值以下

导通条件：晶闸管承受正向电压，同时门极有触发电流时，晶闸管导通。

维持导通条件：流过晶闸管的电流大于维持电流。

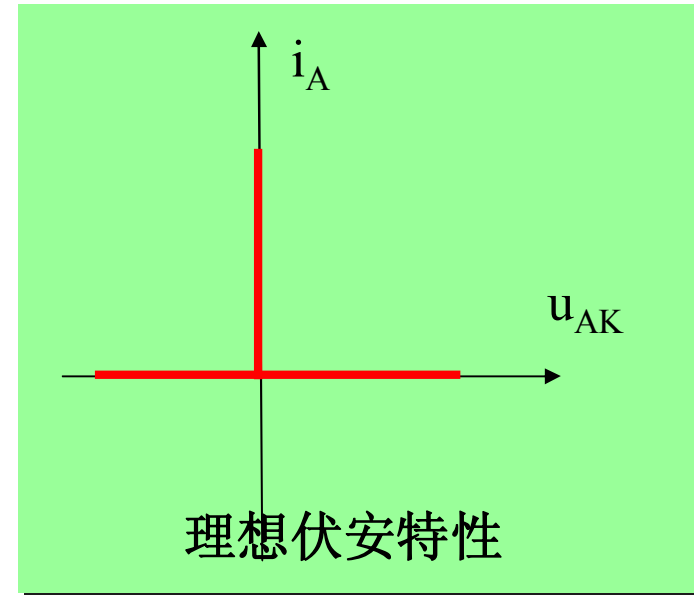
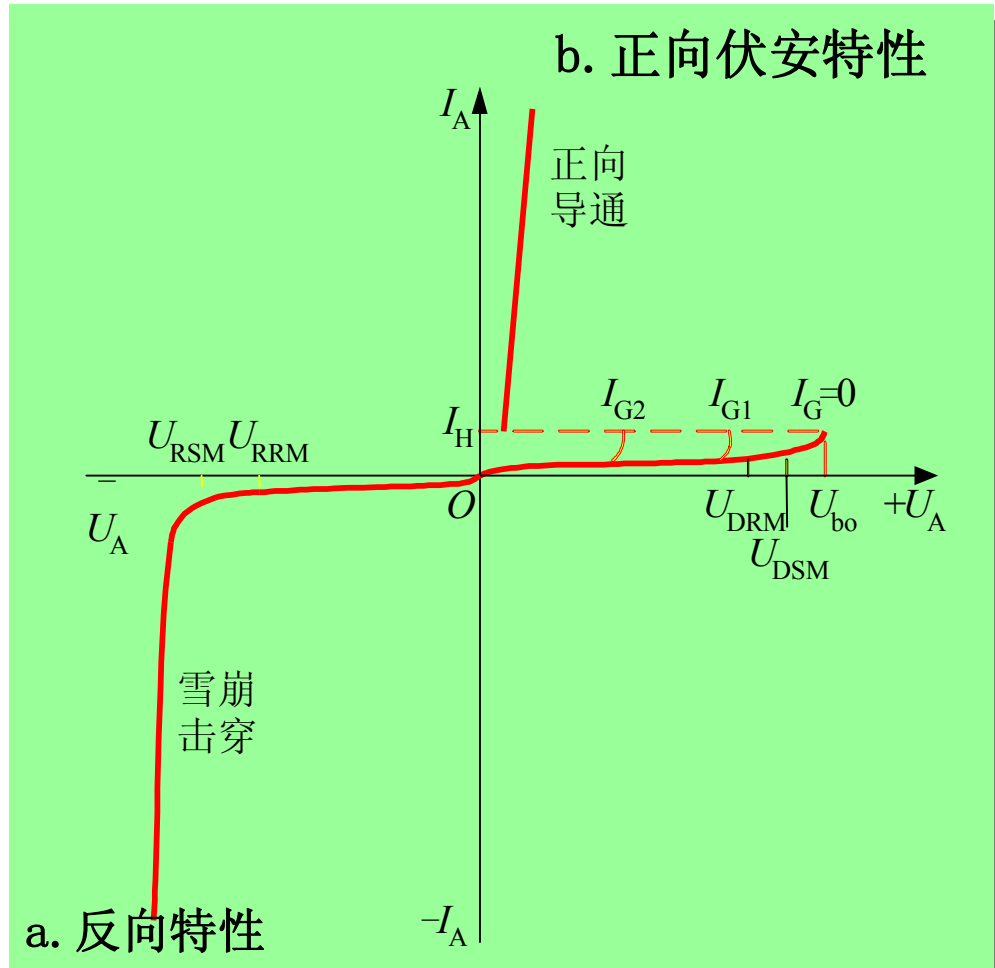
关断条件：晶闸管承受正向电压。

或流过晶闸管的电流小于维持电流。

这三个条件是晶闸管电路分析的基础。

3. 晶闸管的特性

伏安特性



反向特性:

反向阻断时, 只有极小的反相漏电流流过。

当反向电压达到反向击穿电压后, 可能导致晶闸管发热损坏。

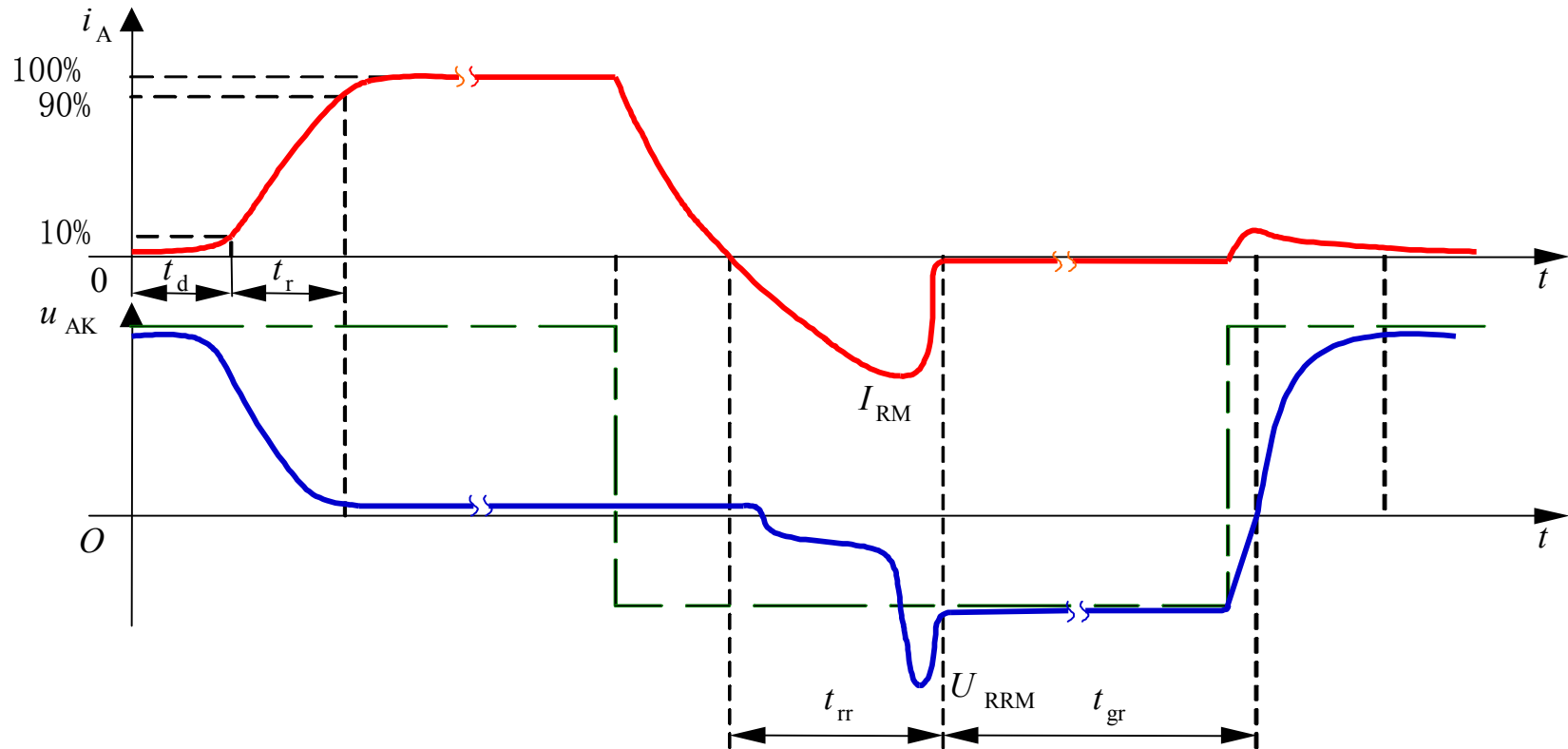
正向特性:

正向阻断状态: $I_G=0$ 时, 器件两端施加正向电压, 只有很小的正向漏电流。

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。

晶闸管的开关特性



晶闸管的导通时间=延迟时间+上升时间

晶闸管关断时间=反向恢复时间+正向恢复时间

4. 晶闸管的主要参数与意义

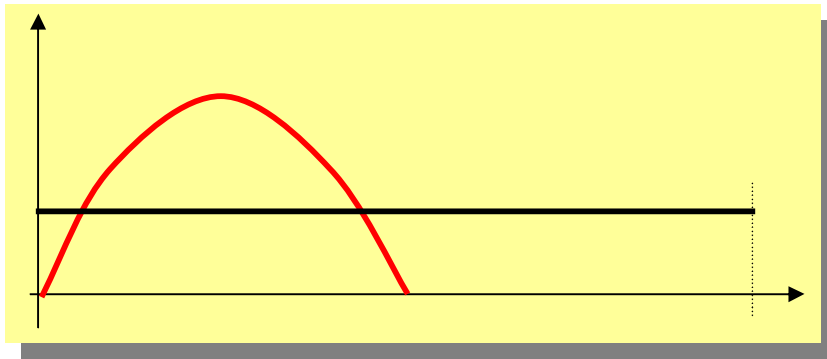
(1) 断态重复峰值电压 (U_{DRM}): 门极开路, 重复率为每秒50次, 持续时间不大于10ms的断态最大脉冲电压。其值为正向转折电压的80%。

(2) 反向重复峰值电压 (U_{RRM}): 其定义同 U_{DRM} , 其值为反向转折电压的80%。

(3) 额定电压: 选 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的值作为额定电压。

额定电压定义复杂。理解为器件安全工作(不误导通或击穿时能承受的最大工作电压)。

(4) 通态平均电流: 指在环境温度为+40° C和规定的冷却条件下, 元件在电阻性负载、导电角不小于170度的单相工频正弦半波整流电路中, 当稳定结温不超过额定值时所允许的最大平均电流。



$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t)$$

发热是器件电流参数的限制条件。

发热量只与有效值有关。

在实际工作中, 电流的波形是不同的。但有效值若相等, 发热量就相同。

当散热条件确定后，要让器件发热不超过其允许值，流过它的电流有效值就不能超过额定值。
定义额定电流的波形的有效值是：

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2}$$

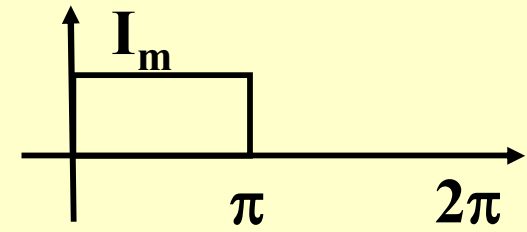
$$\text{而 } I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi}$$

$$\text{消去变量 } I_m \text{ 得: } I_T = \frac{\pi}{2} I_{T(AV)} = 1.57 I_{T(AV)}$$

这表明，一个额定电流为 $I_{T(AV)}$ 的晶闸管允许通过的有效值电流为其额定值的1.57倍。



例1. 流过晶闸管的电流波形如图
问额定电流为100安的晶闸管允许
通过的电流平均值是多少？



解：平均值为：

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m d(\omega t) = \frac{I_m}{2}$$

有效值为：

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ (A)}$$

为使晶闸管安全工作，必须满足：

$$\frac{\pi}{2} I_{T(AV)} \geq \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

从上式解出 I_m

$$I_m \leq \sqrt{2} \frac{\pi}{2} I_{T(AV)} = 222.14 \text{ (A)}$$

代入平均值计算式，得 $I_d = 111.07 \text{ (A)}$

(5) 通态平均电压：晶闸管通以额定通态平均电流时的管压降平均值。

(6) 维持电流：维持晶闸管导通所需要的最小阳极电流。

(7) 断态电压临界上升率：在额定结温和门极断路条件下，使元件从断态转入通态时的最低电压上升率。

(8) 通态电流临界上升率：晶闸管触发导通时不致使元件损坏的通态电流最大上升率。

(9) 门极触发电压、门极触发电流

§ 1-3 门极关断晶闸管(GTO)

GTO的特点

晶闸管的一种派生器件；多元功率集成器件。

可以通过在门极施加正的脉冲电流使其导通；施加负的脉冲电流使其关断。

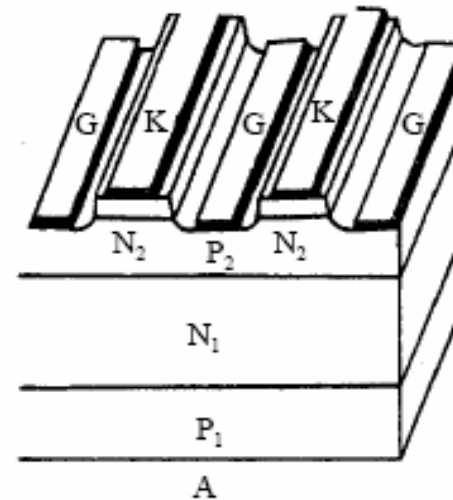
开关频率不高，关断增益小。

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（如电力机车的主电路）。



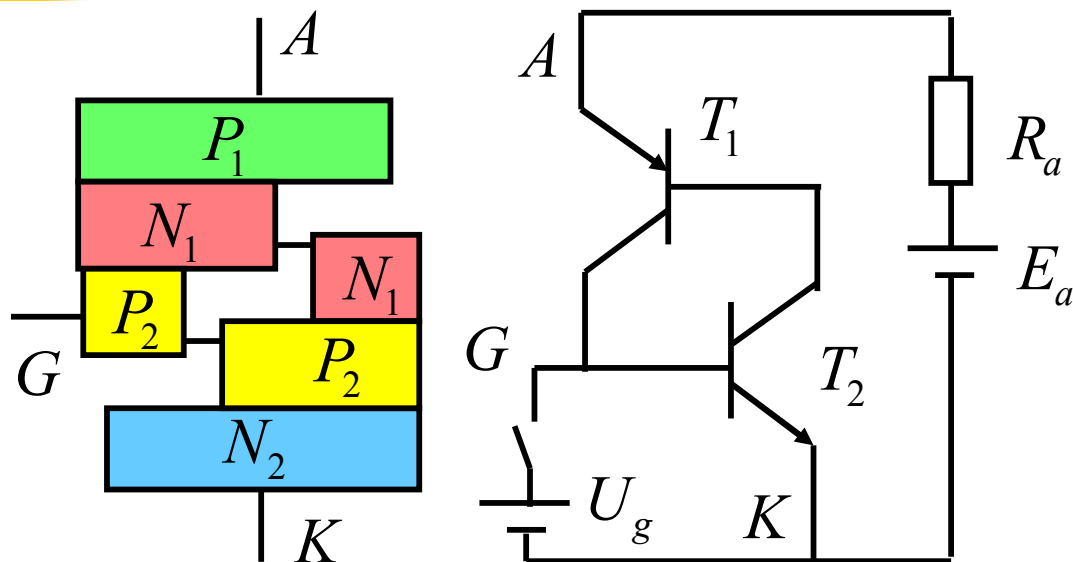
1. GTO的开通与关断原理

GTO是一种共用阳极门极，阴极分离的结构。它由若干小的GTO元并联构成。GTO元与晶闸管一样都是PNPN四层三端结构



GTO元与普通晶闸管相同可用双晶体管模型来分析
GTO的导通过程与普通晶闸管类似。

注入正的门极电流时， T_1T_2 因正反馈而迅速饱和

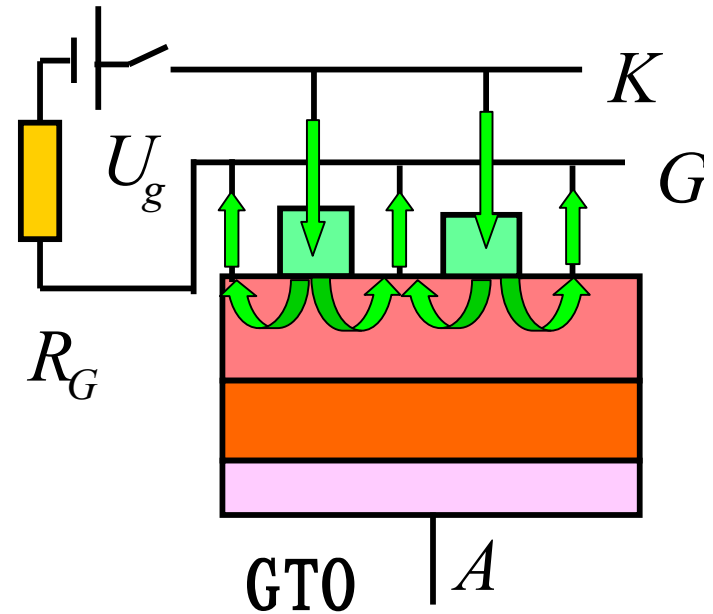
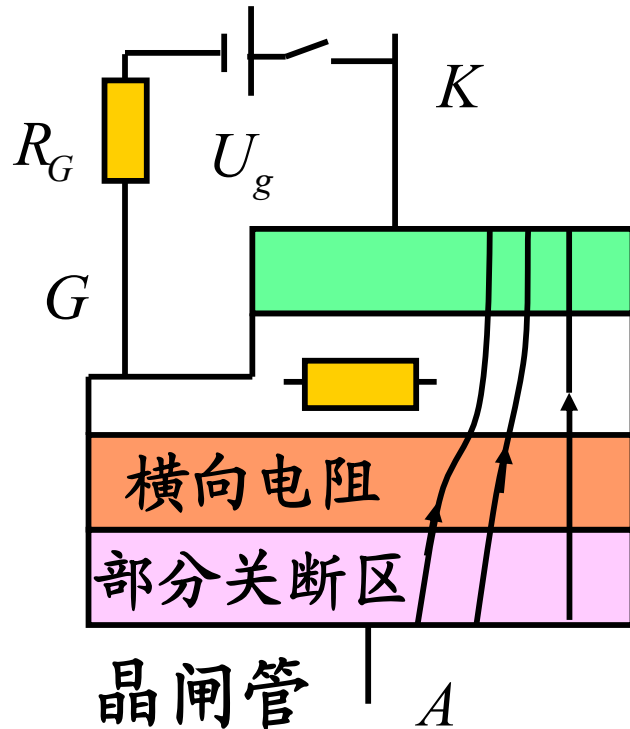


关断时在门极施加反向电压， T_1 管的集电极电流 I_{C1} 被抽出形成门极负电流 $-I_G$ ，这使 T_2 的基极电流减小进而使其集电极电流 I_{C2} 也

也减小，于是引起 I_{C1} 的进一步下降。如此不断循环，GTO元的阳极电流迅速下降到零而关断。

GTO能够用门极负电流信号关断的主要原因在于其门—阴极结构。普通晶闸管在结构上是所谓的“单胞”结构，而GTO的阴极是由许多小块组成，其阴极横向宽度很小，G—K极间横向电阻远小于普通晶闸管，所以

可以用门极负电压抽出等效的 I_{C1} ，从而使器件关断。



GTO严格控制等效三极管的饱和度。GTO的等效三极管工作在浅饱和状态，而晶闸管为深饱和

小结

GT0导通过程与普通晶闸管一样，只是导通时饱和程度较浅。

GT0关断过程中有强烈正反馈使器件退出饱和而关断。

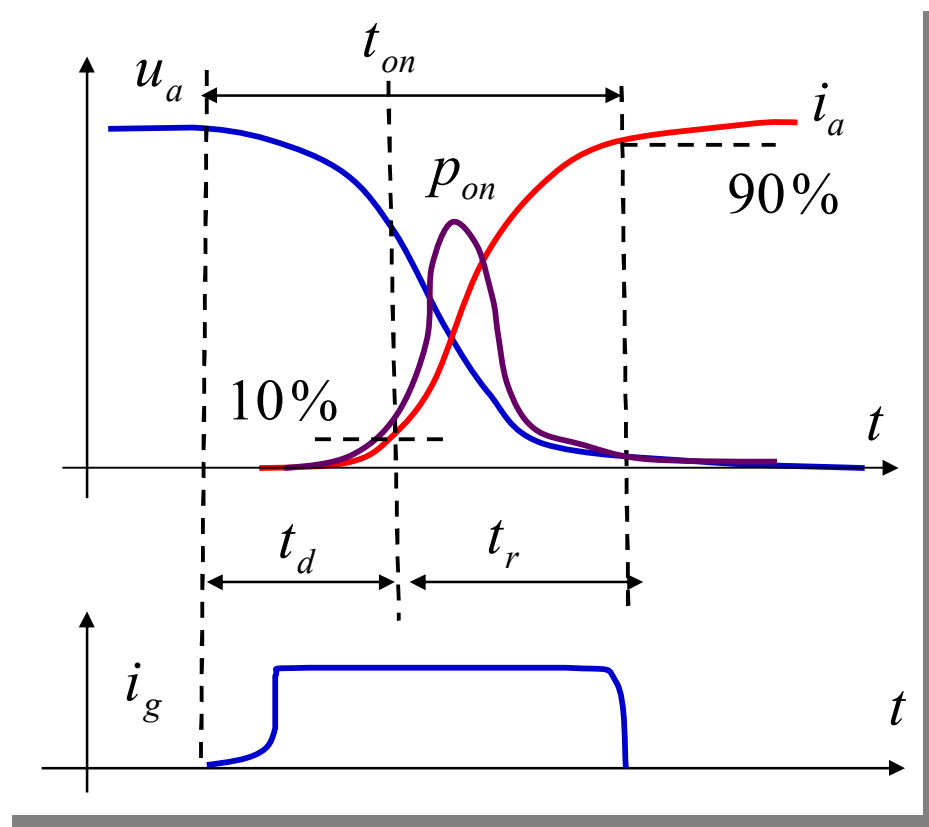
导通时接近临界饱和，有利门极控制关断，但导通时管压降增大。

多元集成结构，使GT0比普通晶闸管开通过程快，承受 di/dt 能力强。

多元集成结构，使GT0容易在关断过程中损坏。

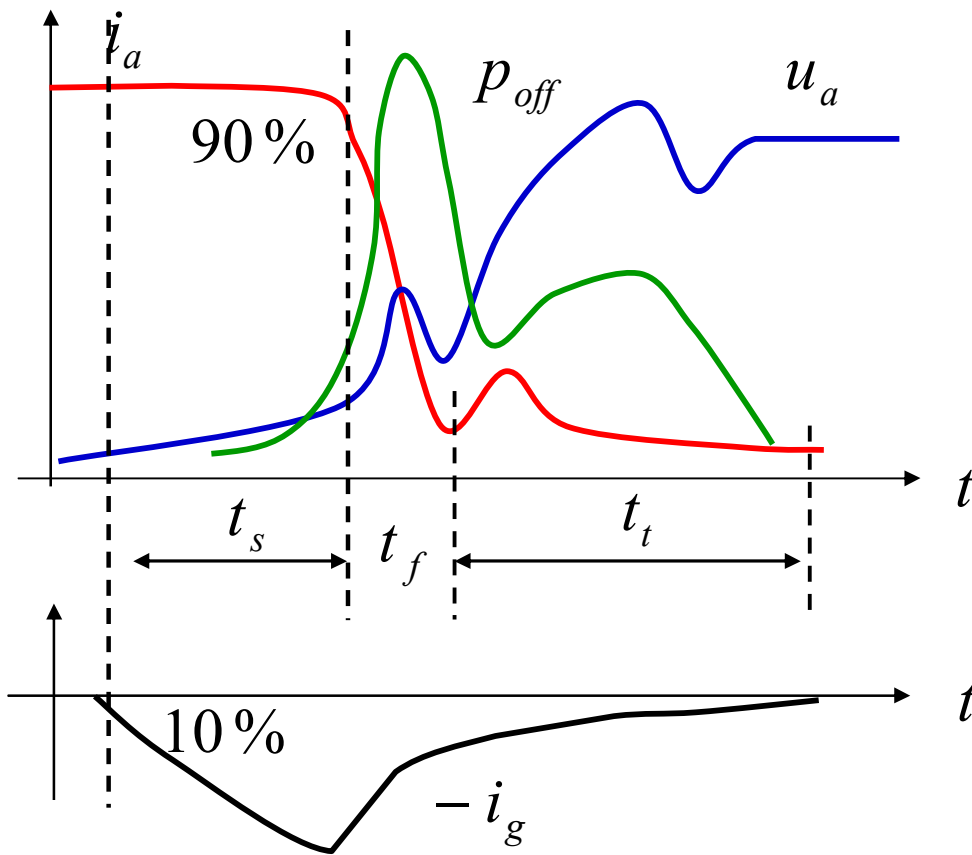


2 GTO的开关特性



GTO开通

GT0关断



存储时间 t_s ，使等效晶体管退出饱和。

下降时间 t_f

尾部时间 t_t ：残存载流子复合。

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， t_s 越短。

3. GTO的主要参数

1) **可关断峰值电流 I_{TGQM}** : GTO的阳极可关断电流的最大值, 即可关断峰值电流。(额定电流)

2) **关断时的阳极尖峰电压 V_p**

尖峰电压是阳极电流在 t_f 时间内的电流变化率与缓冲电路中的电感的乘积。尖峰电压 V_p 与阳极电流成正比, 并直接决定了关断损耗。

3) **阳极电压上升率 du/dt**

阳极电压上升率 du/dt 分为静态与动态两种。前者与晶闸管相同; 后者指的是关断过程中的阳极电压上升率, 又称重加 du/dt 。

4) 阳极电流上升率 di/dt

GT0能承受的极限电流上升率。

5) 电流关断增益

最大可关断阳极电流与门极负脉冲最大值之比：

$$\beta_{\text{off}} = I_{\text{ATO}} / I_{\text{GM}} \quad \beta_{\text{off}} = 3-5$$

6) 开通时间与关断时间

开通时间是延迟时间与上升时间之和

关断时间是存储时间与下降时间之和

GT0的其它参数与晶闸管相似。它正在被淘汰。



集成门极换相晶闸管IGCT

GT0是多元集成器件。主要问题是如何保证在关断时各个单元动作的一致。GT0损坏的主要原因之一是在关断过程中阴极导电面积的收缩引起电流的集中与关断的不同步。

IGCT的关断增益为1。即门极关断电流幅值不小于阳极电流。这样可将流过阴极的电流全部从门极抽出。GT0以PNP三极管方式关断。

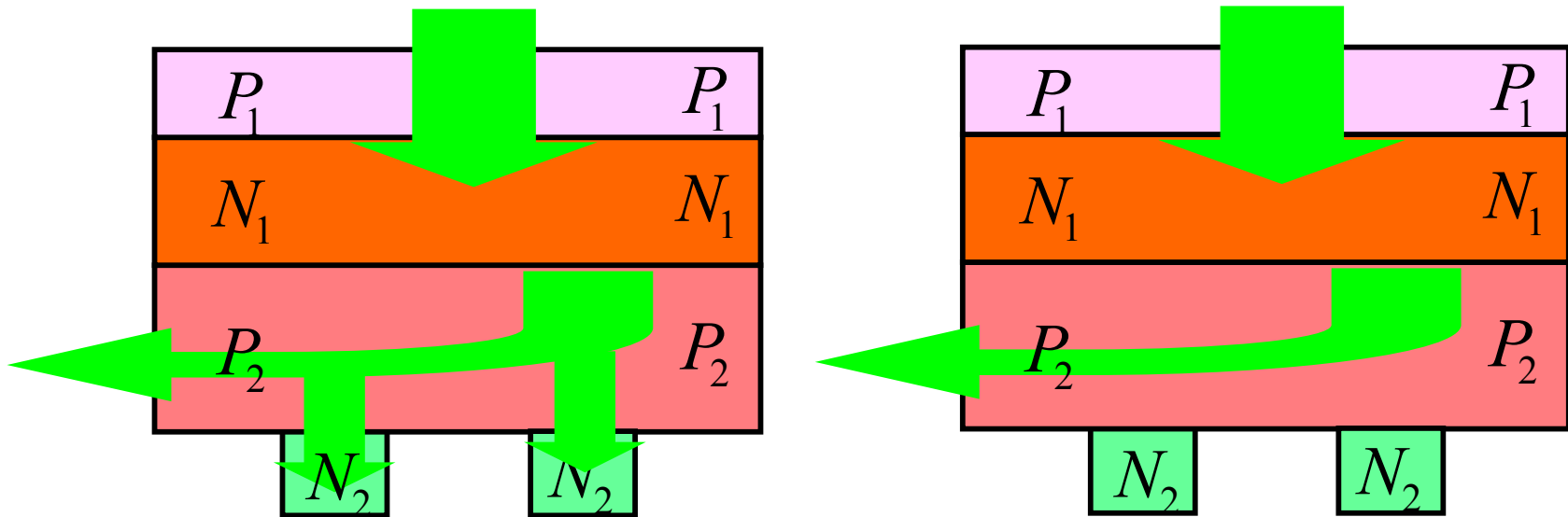
IGCT的特点与GT0相似。但工作频率更高。为提供巨大的门极关断电流，必须将门极电路紧靠主开关安放。

仅内部使用 郭小舟



西南交通大学





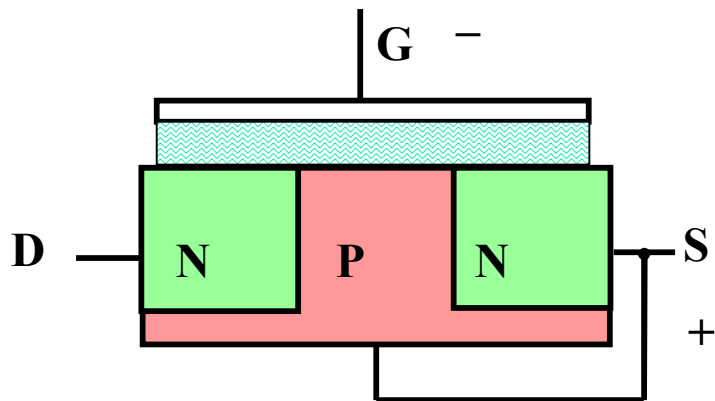
GT0与GCT的关断方式比较：GT0抽出部份载流子使等效三极管产生正反馈而迅速关断；GCT抽出全部载流子使GCT以PNP三极管方式关断。

结合了IGBT与GT0的优点，容量与GT0相当，开关速度快10倍。省去GT0复杂的缓冲电路，但驱动功率仍很大。

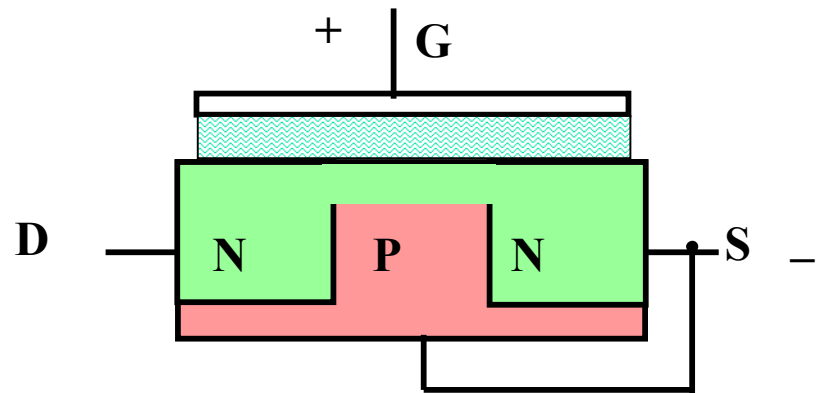
§ 1-4 电力场效应管 (MOSFET)

1. 工作原理

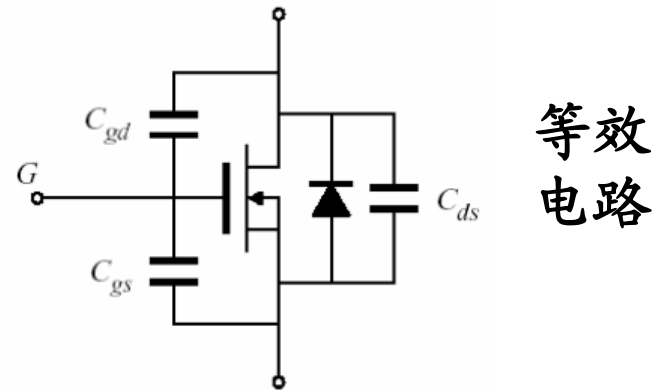
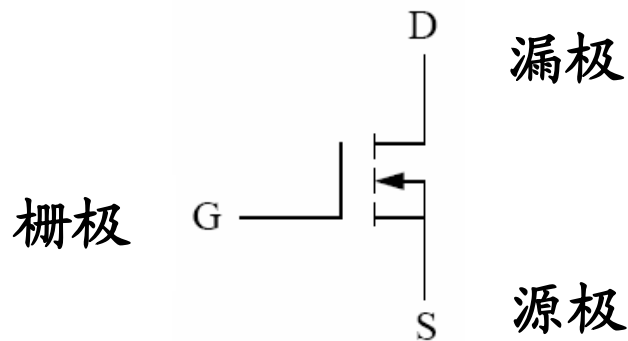
P型反型成N型，形成N沟道使PN结消失，漏源极间导通；反型消失N沟道消失，PN结出现，漏源极间截止



漏极D接外加电压的高电位，源极S接低电位。源极与衬底相联。 V_{GS} 为负时漏源之间不导电。



漏极D接外加电压的高电位，源极S接低电位。源极与衬底相联。 V_{GS} 为正时漏源之间导通。



2. 场效应管的特点：

靠一种载流子导电的器件。开关速度极高，热稳定性好；

没有二次击穿现象。可靠性高，安全工作区大容易并联。

电压控制器件。驱动功率小，驱动电路简单
导通电阻大，导通损耗大，元件的电压值小
导通电阻随阻断电压的升高而迅速升高
主要用于小功率电路，如开关电源。

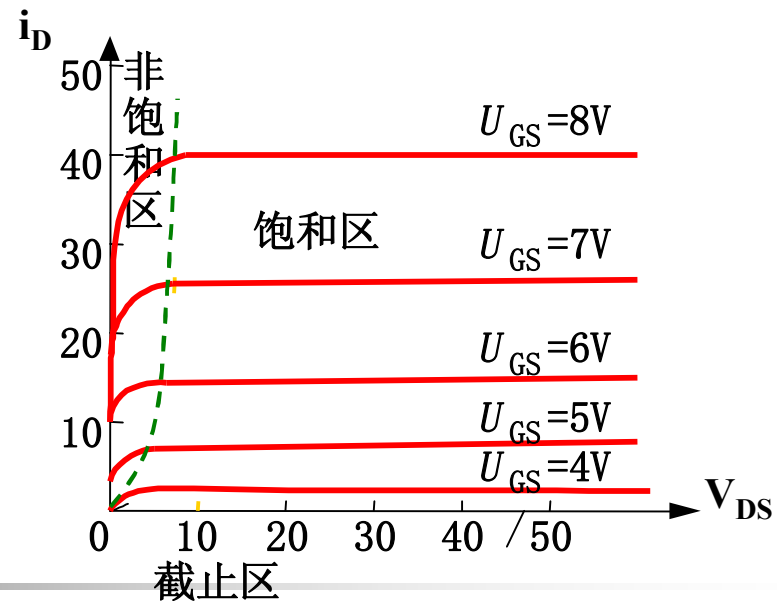
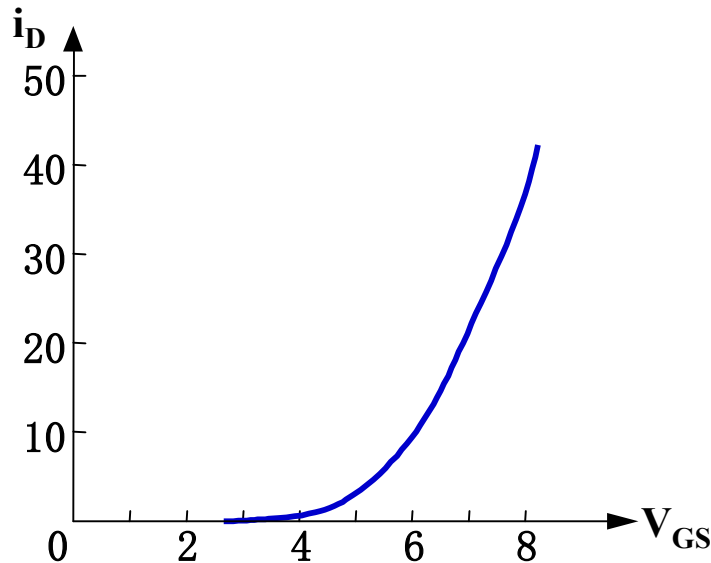
3 电力MOSFET的基本特性

1) 静态特性

转移特性：漏极电流和栅源间电压的关系

漏极伏安特性(或输出特性)：

截止区（对应于GTR的截止区）； **饱和区**（对应于GTR的放大区）； **非饱和区**（对应GTR的饱和区）



2) 开关特性

一个有阻抗的信号源
给FET提供栅极信

号。开关响应如图

开通时间：开通延迟
时间与上升时间之和

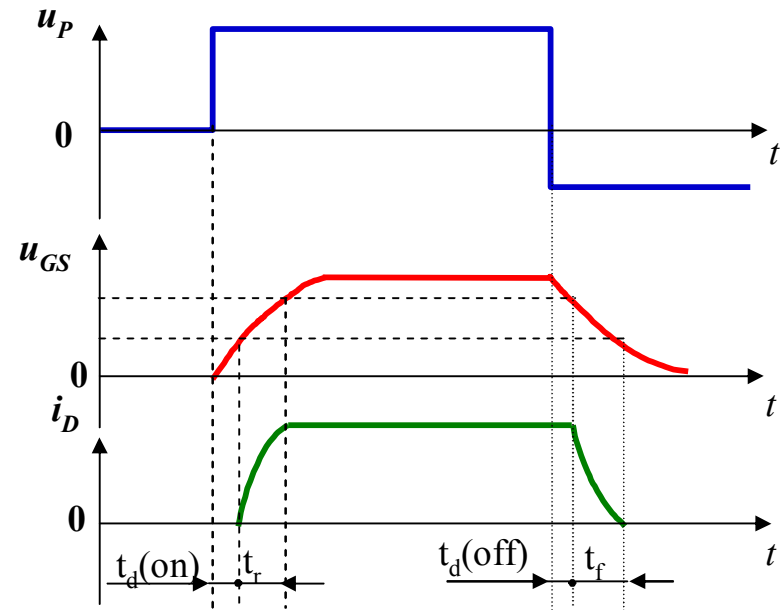
关断时间：关断延迟时间与下降时间之和。

特点：

开关速度和栅极输入电容的大小有关。降低驱动
电路内阻可加快开关速度。

不存在少子储存效应，关断过程非常迅速

工作频率可达1M以上，为电力电子器件中最高



场控器件，静态时几乎不需输入电流。但在开关过程中需驱动输入电容，仍需一定的驱动功率
开关频率越高，所需要的驱动功率越大

3) 电力MOSFET的主要参数

- (1) 漏极电压 U_{DS} ——电力MOSFET电压定额
- (2) 漏极直流电流 I_D 和漏极脉冲电流幅值 I_{DM} ——电力MOSFET电流定额
- (3) 栅源电压 U_{GS}
- (4) 极间电容

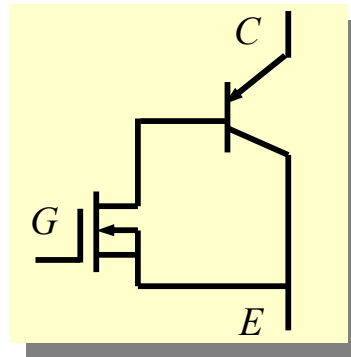
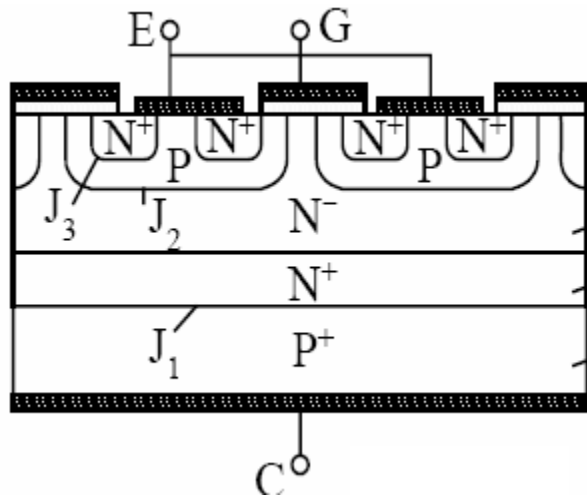
其它参数与电子学中相同



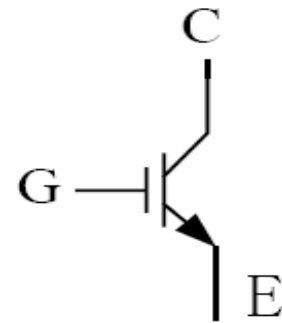
§ 1-5 绝缘栅极双极型三极管 (IGBT)

GTR和MOSFET复合，结合了二者的优点；
开关速度快，开关损耗小，安全工作区大，具有耐
脉冲电流冲击能力；
输入阻抗高，输入特性与MOSFET类似，驱动容易

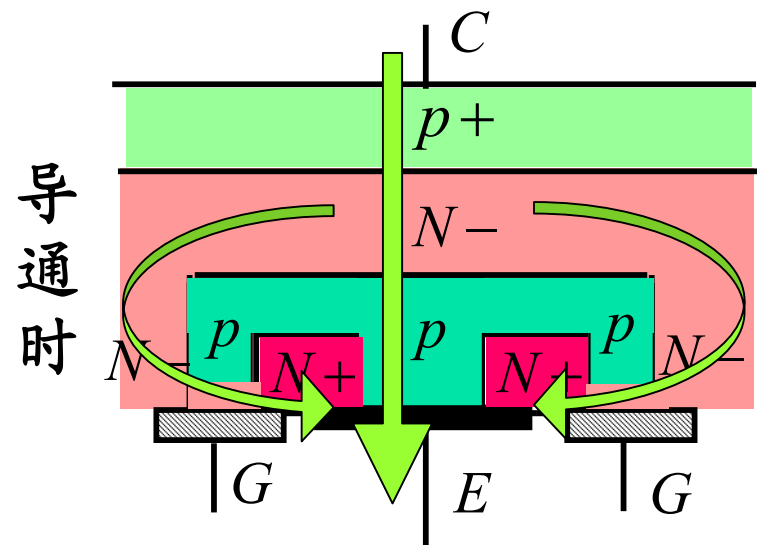
1 IGBT的结构与工作原理



等效
电路



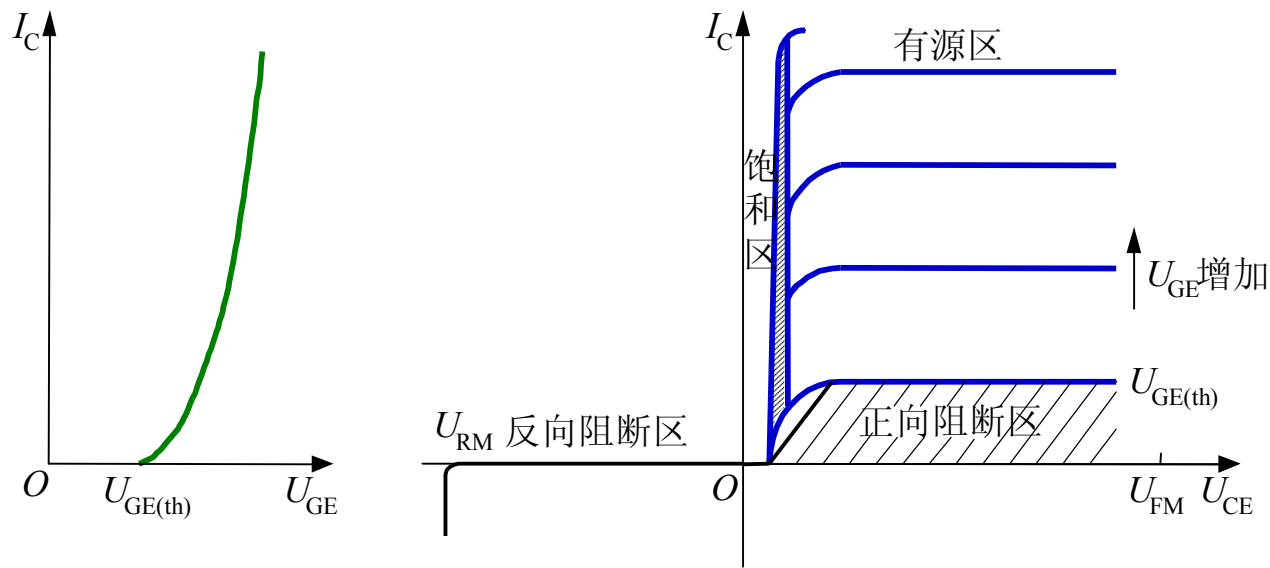
当栅极上加正的电压时，控制极G下的P层表面形成N沟道，发射极与N-区接通，等效三极管的基极电流经N沟道流动，由于电调制效应，N-区电阻降低电流增大，元件导通。



2 IGBT的特性

(1) IGBT的静态特性

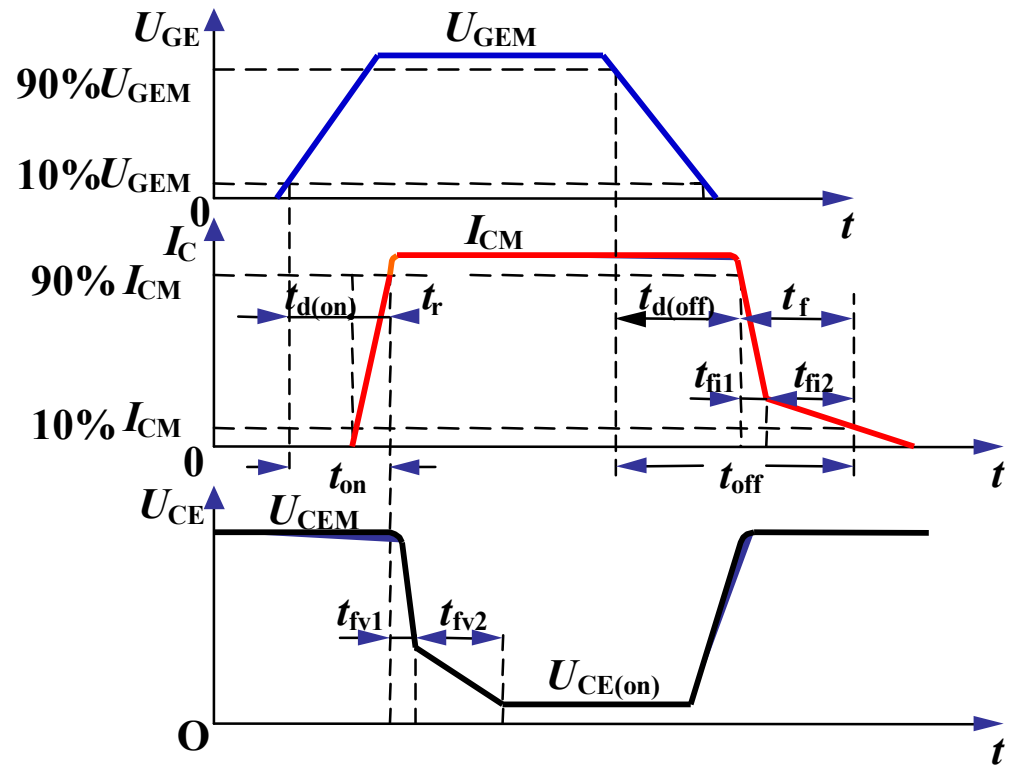
IGBT的转移特性和输出特性



在电力电子电路中，只允许工作在饱和区或截止区，不能在有源区(放大区)

(2) IGBT的开关特性

IGBT 的开通过程与 MOSFET 相似，开通时间 t_{on} 为延迟时间 $t_{d(on)}$ 与电流上升时间 t_r 之和。



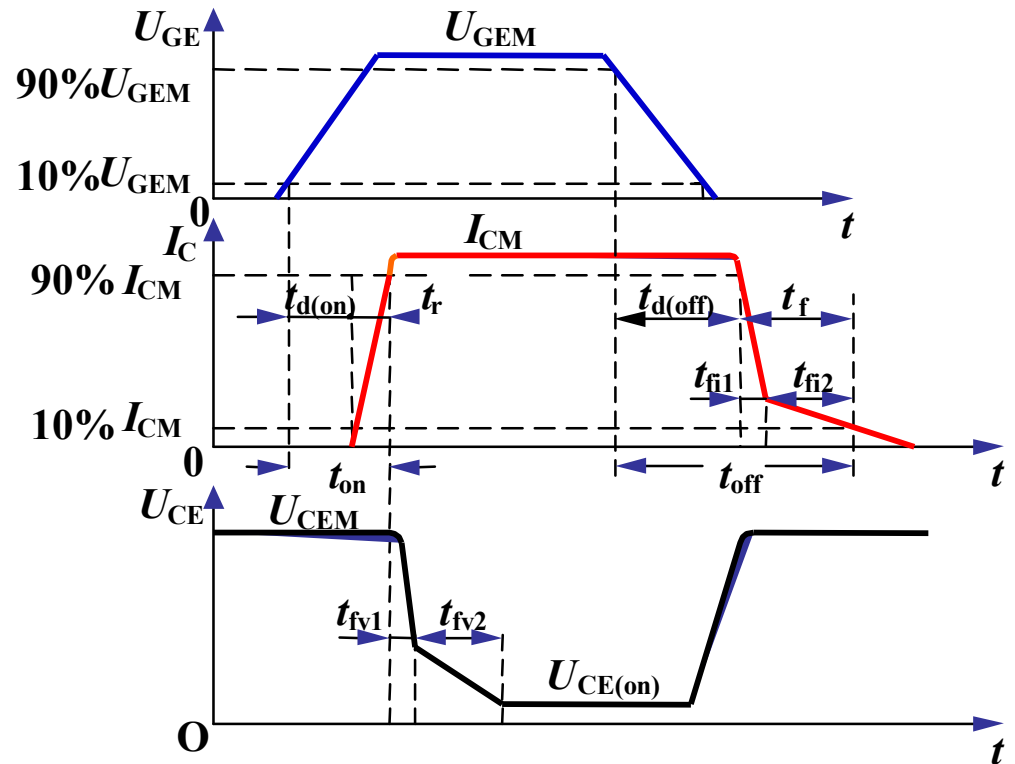
t_{fv1} —MOSFET单独工作的电压下降过程;
 t_{fv2} —MOSFET和PNP晶体管同时工作的电压下降过程。

关断特性:

IGBT的关断时间 t_{off} 为延迟时间 $t_{d(off)}$ 与电流下降时间 t_r 构成。

t_{fi1} ——IGBT器件内部的MOSFET的关断过程， i_c 下降较快

t_{fi2} ——IGBT内部的PNP晶体管的关断过程， i_c 下降较慢。IGBT关断时，有大的电流下降率与显著的尾部电流。前者是场效应管关断的结果，后者是PNP三极管造成的。



3 IGBT的参数

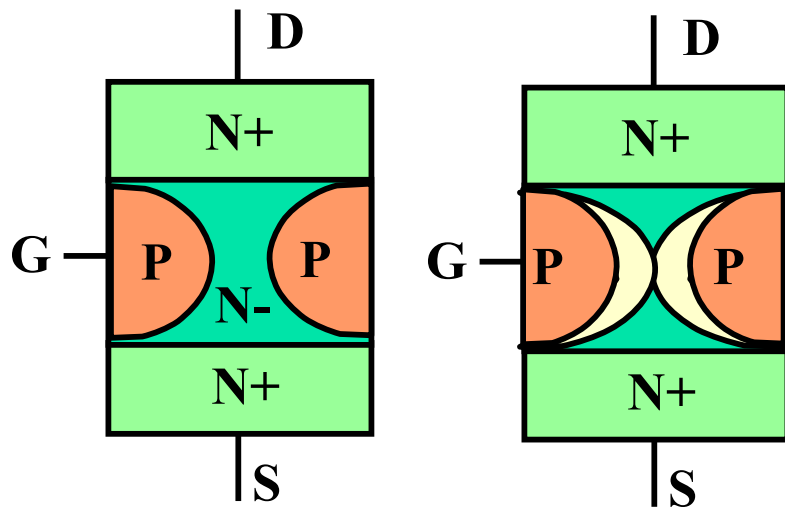
- (1) **最大集射极间电压 U_{CES}** : 由内部PNP晶体管的击穿电压确定
- (2) **最大集电极电流**: 包括额定直流电流 I_C 和1ms脉宽最大电流 I_{CP}
- (3) **最大集电极功耗 P_{CM}** : 正常工作温度下允许的最大功耗

IGBT的其它参数参见相关的资料

§ 1-6 其它电力半导体开关器件

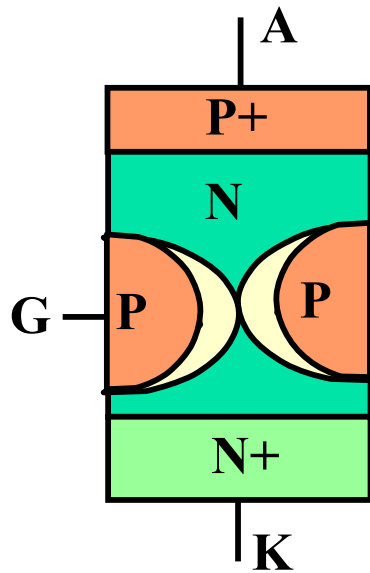
1. 静电感应晶体管SIT (结型场效应管)

静电感应晶体管SIT (Static Induction Transistor) 是一种依靠场效应引起元件中导电沟道形成或消失、实现开关功能的器件。SIT具有输出功率大、失真小、输入阻抗高、开关频率高、热稳定性好以及抗辐射能力强等一系列优点



栅源电压为零时，器件处于导通状态。栅源极间施加负的电压，这使PN结对应的空间电荷区（也称“耗尽层”）变厚，使导电沟道消失，器件关断。

2. 静电感应晶闸管SITH (Static Induction Thyristor)



在静电感应晶体管的结构上加一P型层即构成SITH。当SITH的A接电源正、K接负、 U_{GK} 不为负时，电流能从A流向K。 U_{GK} 为负时，PN间形成耗尽层，器件截止。

特点：高压、在电流、高频、有尾部电流、关断时间短、 di/dt 、 du/dt 大

3. MOS控制晶闸管MCT

MCT是在SCR结构中集成一对MOSFET，使MCT导通的MOSFET称为ON—FET，使MCT关断的MOSFET称为OFF—FET。一般，ON—FET均为P沟道，所以，也称这种MCT为P—MCT。

The diagram shows a CMOS inverter circuit. It consists of an NPN transistor T_1 and a PNP transistor T_2 . The input G is connected to the gates of both transistors. The emitter of T_1 and the emitter of T_2 are connected to a common output terminal K . The collector of T_1 is connected to the output terminal A , and the collector of T_2 is also connected to A . The circuit is labeled with "OFF-FET N沟道" and "ON-FET P沟道".

4. 功率集成电路 (PIC) 与智能型器件 (IPM)

功率集成电路可分为单片功率集成电路MPIC (Monolithic Power Integrated Circuit) 和混合功率集成电路HPIC (Hybrid Power Integrated Circuit)。功率集成电路是电力电子技术与微电子技术相结合的产物，它将横向高压器件与低压控制电路，诸如移位寄存器、逻辑电路、锁存电路、放大、比较、基准电压、三角波发生器、传感器电路、ROM和PWM控制电路、以及过电压、过电流、过热、防干扰等保护电路集成在一起。从而极大地简化了电路，也使系统的可靠性大大提高。

MPIC主要用于：

电动机控制方面如办公室自动化、家电、汽车等使用的各种电动机如磁阻电动机、无换向器电动机、异步电动机的控制。



电源电路。

汽车电路以及平板显示电路。

HPIC是在绝缘基板上，通过厚膜技术或薄膜技术形成导体和电阻，在基板上把包括有大规模集成电路的半导体元件、电容、电感及其他电子部件连成一体集成电路。

智能型器件IPM (Intelligent Power Module) 是一种在IGBT基础上再集成栅极控制电路、故障检测电路和故障保护电路的电力电子模块。IPM具有短路、过载、过热、欠电压等保护性能，它的输入级由MOS器件构成，开关频率高、输入阻抗很高，它的输出电压和电流相当大，而饱和压降又较低，是一种应用很广的第三代器件。



作业: P43

1.5

1.6



仅内部使用 郭小舟

谢谢各位

西南交通大学

