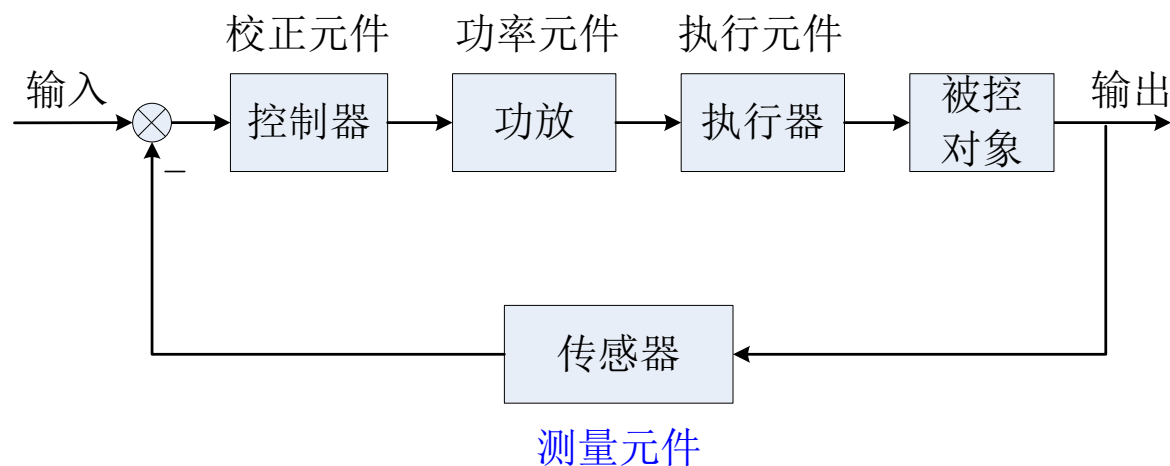


自动控制实践 功率放大元件概述

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 伊国兴

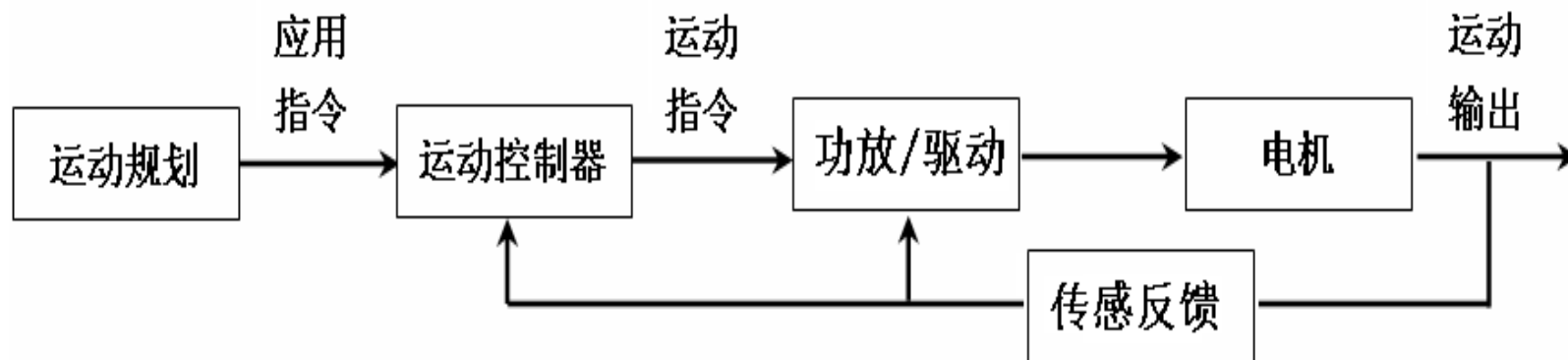
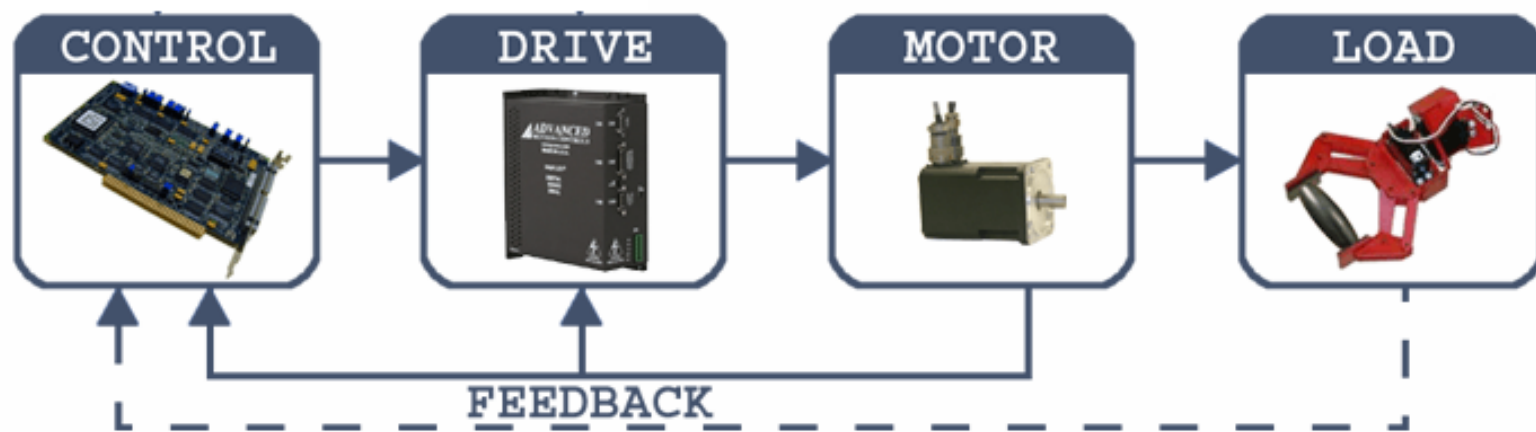


控制系统



- ❖ **执行元件:** 功能是驱动被控对象，控制或改变被控量
- ❖ **放大元件:** 提供能量，将微弱控制信号放大驱动执行元件。
- ❖ **校正元件:** 作用是改善系统的性能，使系统能正常可靠地工作并达到规定的性能指标
- ❖ **测量元件:** 将一种量按照某种规律转换成容易处理的另一种量的元件。
(将外界输入型号变换为电信号的元件。)

运动控制系统的构成



对功率放大环节的要求

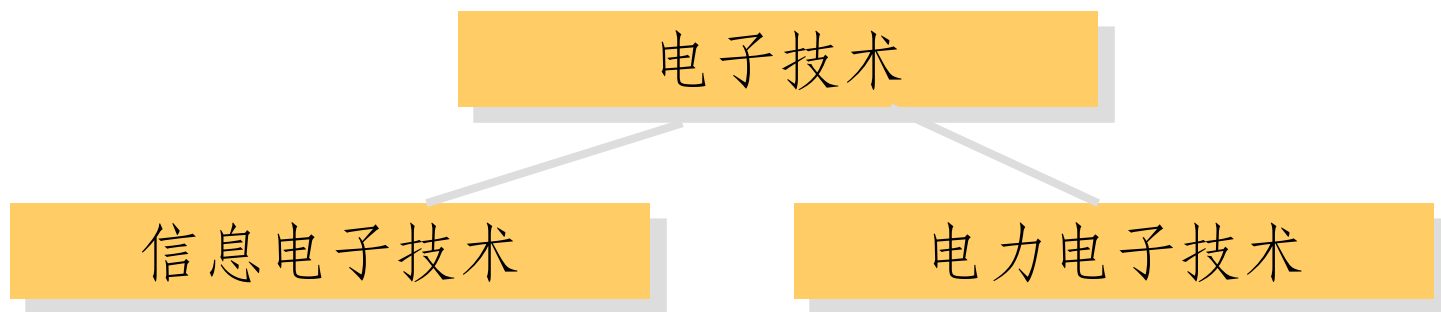
- ❖ 能够输出足够的电压、电流（功率）；
- ❖ 输出信号的失真小，或称输出线性度好；
- ❖ 具备可靠的限压、限流、过热保护等安全保护功能；
- ❖ 根据应用特点可实现功率流向控制；
- ❖ 驱动运行中具有良好的效率。

功率放大环节的类型



线性功放	开关功放
<p>优点</p> <ul style="list-style-type: none">• 电磁兼容性好• 电路简单，适合于低成本简单应用• 电压、电流纹波小	<p>优点</p> <ul style="list-style-type: none">• 效率高• 适合于数字化控制• 适合于大功率驱动
<p>缺点</p> <ul style="list-style-type: none">• 效率低，仅用于小功率场合	<p>缺点</p> <ul style="list-style-type: none">• 电磁兼容性问题

电力电子技术概述



- ❖ 信息电子技术——模拟电子技术和数字电子技术，主要用于信息处理
- ❖ 电力电子技术——应用于电力领域的电子技术，使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。

电力电子技术概述

❖ 变流技术（电力电子器件应用技术）

- 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，及构成电力电子装置和电力电子系统的技术
- 电力电子技术的核心，理论基础是电路理论

❖ 电力电子器件制造技术

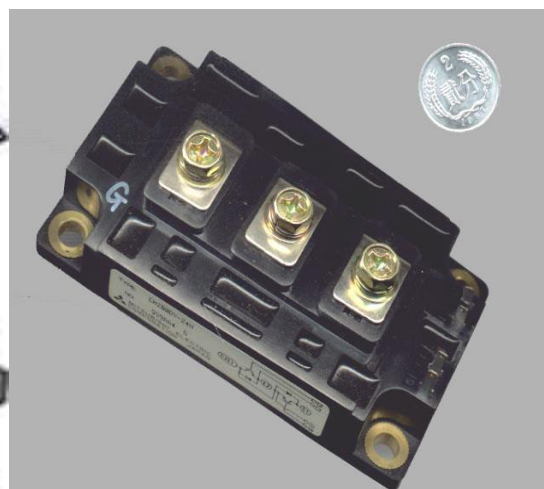
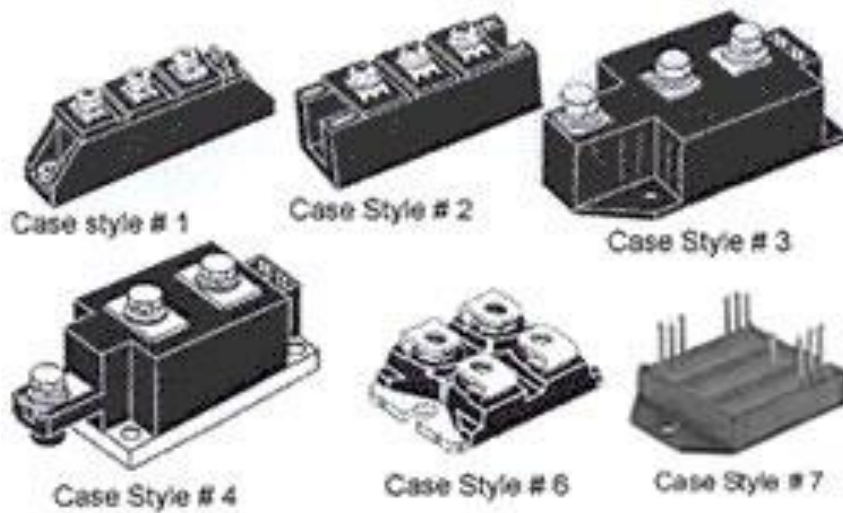
- 电力电子技术的基础，理论基础是半导体物理

输入 输出	交流	直流
	交流	直流
直流	整流	直流斩波
交流	交流电力控制 变频、变相	逆变

电力电子技术概述

- ❖ 电力电子技术的应用：
- ❖ 一般工业：电源、冶炼、电化学……
- ❖ 交通运输：电动车辆，航空航天，电梯……
- ❖ 电力系统：输电，变电，电能质量管理……
- ❖ 家用电器：照明，家电，数码娱乐设备……
- ❖ 其它：工业与办公自动化、新能源应用……

电力电子器件



双管 IGBT 模块 (200A/1200V)



塑料封装 IGBT (25A/1000V)



平板型晶闸管 (500A/6500V)

电力电子器件-概述

- ❖ 电力电子器件 (power electronic device) ——可直接用于处理电能的主电路中，实现电能的变换或控制的电子器件
- ❖ 主电路 (main power circuit) ——电气设备或电力系统中，直接承担电能的变换或控制任务的电路。
- ❖ 电力电子器件发展的目标是：大容量、高频率、易驱动、低损耗、小体积（高芯片利用率）、模块化。

电力电子器件分类

a. 按照开关类型划分

- ❖ 半控型器件——通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断
 - 晶闸管 (Thyristor) 及其大部分派生器件
 - 器件的关断由其在主电路中承受的电压和电流决定
- ❖ 全控型器件——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
 - 绝缘栅双极晶体管IGBT
 - 电力场效应晶体管P-MOSFET
 - 门极可关断晶闸管 GTO
- ❖ 不可控器件——不能用控制信号来控制其通断
 - 电力二极管 (Power Diode)
 - 通和断是其在主电路中承受的电压和电流决定

电力电子器件分类

b. 按照驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号的性质，分为两类：

- ❖ 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
- ❖ 电压驱动型器件是通过加在控制端上的电压在器件的两个主电路端子之间产生可控的电场来改变流过器件的电流大小和通断状态，所以又称为场控器件，或场效应器件。

电力电子器件分类

b.按照器件内部载流子参与导电的情况分为三类：

- ❖ 单极型器件——由一种载流子参与导电的器件，如MOSFET
- ❖ 双极型器件——由电子和空穴两种载流子参与导电的器件，如SCR、GTR、GTO
- ❖ 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，如IGBT

电力电子器件-特征



电力电子器件特征

- ❖ 能处理电功率的大小（即承受电压和电流的能力），是最重要的参数
- ❖ 一般都工作在开关状态
- ❖ 实用中，往往需要由信息电子电路来控制
- ❖ 为保证不致于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏，不仅在器件封装上讲究散热设计，在其工作时一般都要安装散热器

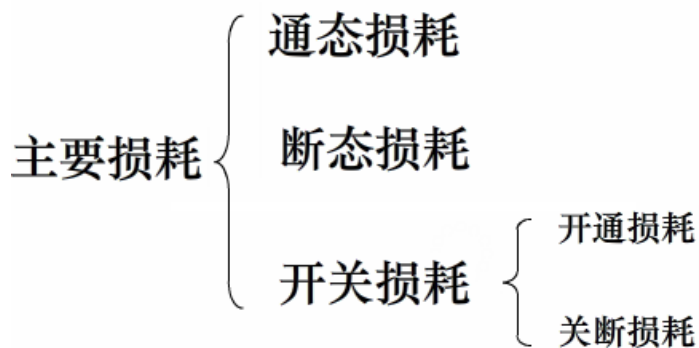
开关状态



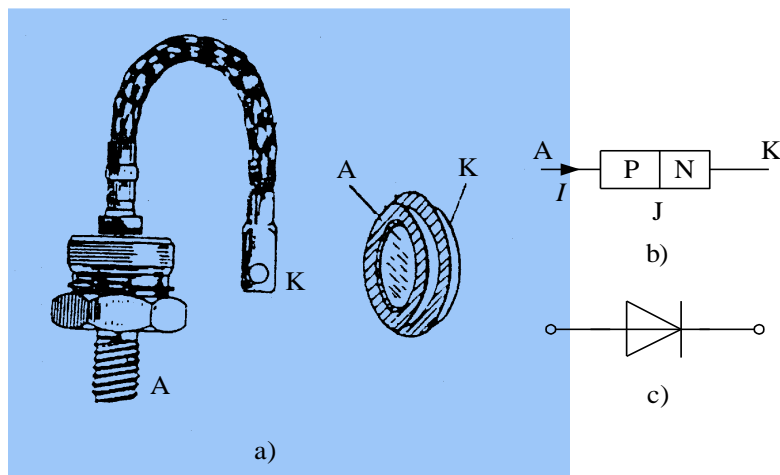
- ❖ 导通时（通态）阻抗很小，接近于短路，管压降接近于零，而电流由外电路决定。
- ❖ 阻断时（断态）阻抗很大，接近于断路，电流几乎为零，而管子两端电压由外电路决定。
- ❖ 电力电子器件的动态特性（也就是开关特性）和参数，也是电力电子器件特性很重要的方面，有些时候甚至上升为第一位的重要问题。
- ❖ 作电路分析时，为简单起见往往用理想开关来代替。

功率损耗

- ❖ 导通的通态压降形成通态损耗；阻断时微小的断态漏电流形成断态损耗。
- ❖ 开关转换过程中产生开通损耗和关断损耗，总称开关损耗。
- ❖ 对某些器件来讲，驱动电路向其注入的功率也是造成器件发热的原因之一。
- ❖ 断态漏电流极小，通态损耗是器件功率损耗的主要成因。
- ❖ 开关频率较高时，开关损耗会随之增大而可能成为器件功率损耗的主要因素。



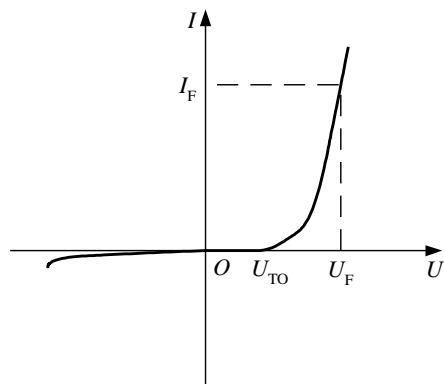
电力二极管



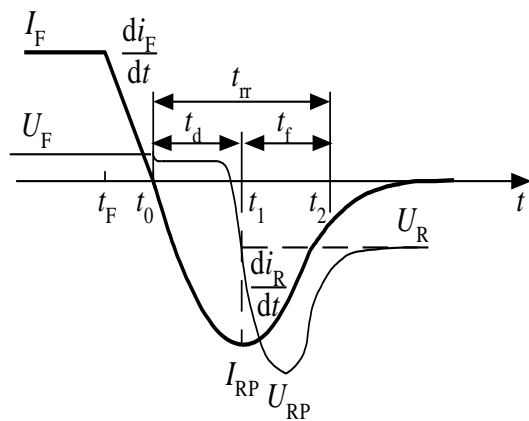
- ❖ 基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管一样以半导体PN结为基础。
- ❖ 由一个面积较大的PN结和两端引线以及封装组成的。
- ❖ 从外形上看，主要有螺栓型和平板型两种封装。



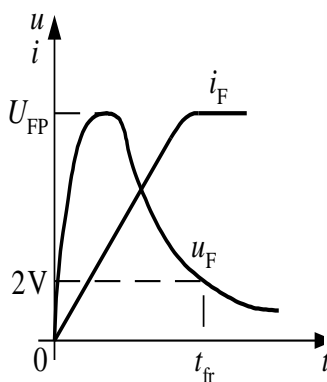
电力二极管特性



伏安特性



正向偏置转换为反向偏置



零偏置转换为正向偏置

- ◆ 门槛电压 U_{TO} ，正向电流 I_F 开始明显增加所对应的电压。
- ◆ 与 I_F 对应的电力二极管两端的电压即为其正向电压降 U_F 。
- ◆ 承受反向电压时，只有微小而数值恒定的反向漏电流。

电力二极管的主要参数



1. 正向平均电流 $I_F(AV)$

额定电流——在指定的管壳温度（简称壳温，用 T_C 表示）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。

2. 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。

3. 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，通常是其雪崩击穿电压的 $2/3$ ，使用时，往往按照电路中电力二极管可能承受的反向最高峰值电压的两倍来选定。

电力二极管的主要参数

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，最高工作结温是指在PN结不致损坏的前提下所能承受的最高平均温度， T_{JM} 通常在 $125\sim 175^\circ\text{C}$ 范围之内

5. 反向恢复时间 t_{rr}

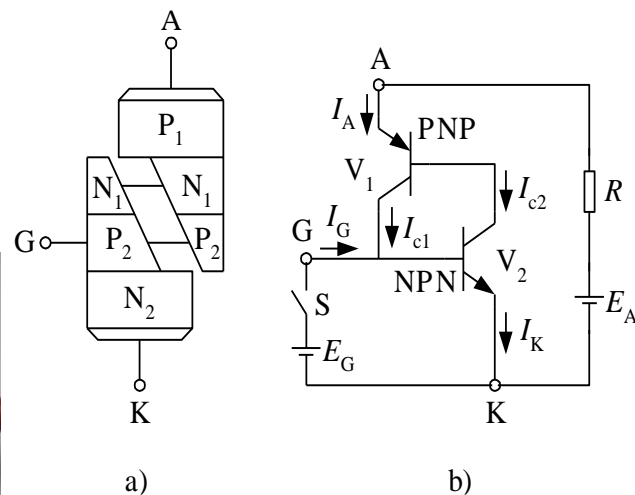
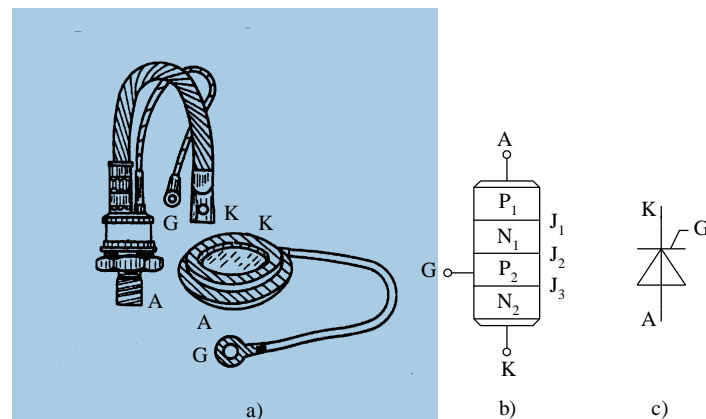
关断过程中，电流降到0起到恢复反向阻断能力止的时间

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。

晶闸管的结构与工作原理

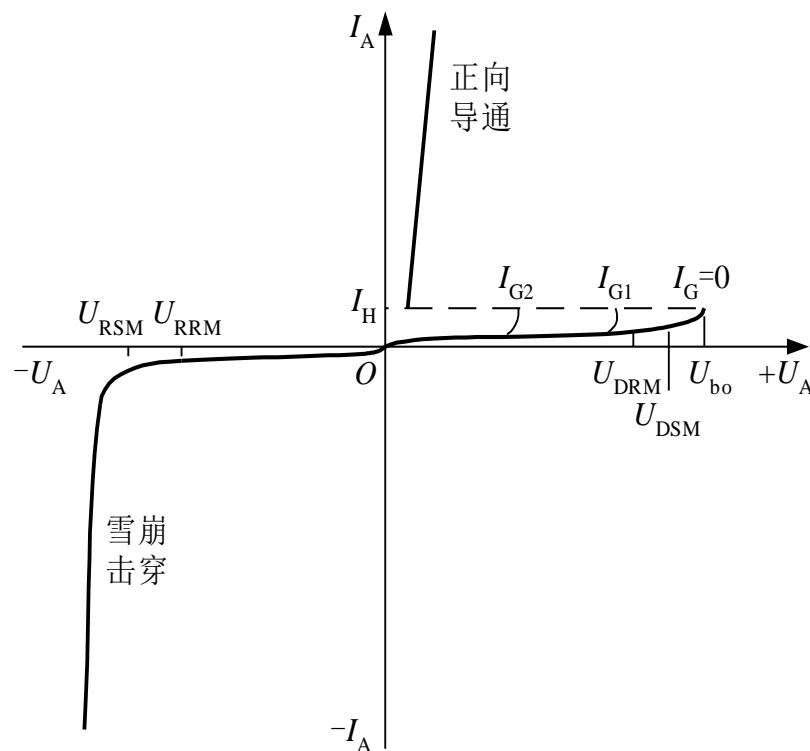
- ❖ 外形有螺栓型和平板型两种封装
- ❖ 引出阳极A、阴极K和门极G三个联接端
- ❖ 对于螺栓型封装，通常螺栓是其阳极，能与散热器紧密联接且安装方便
- ❖ 平板型封装的晶闸管可由两个散热器将其夹在中间



晶闸管的基本特性

晶闸管的伏安特性

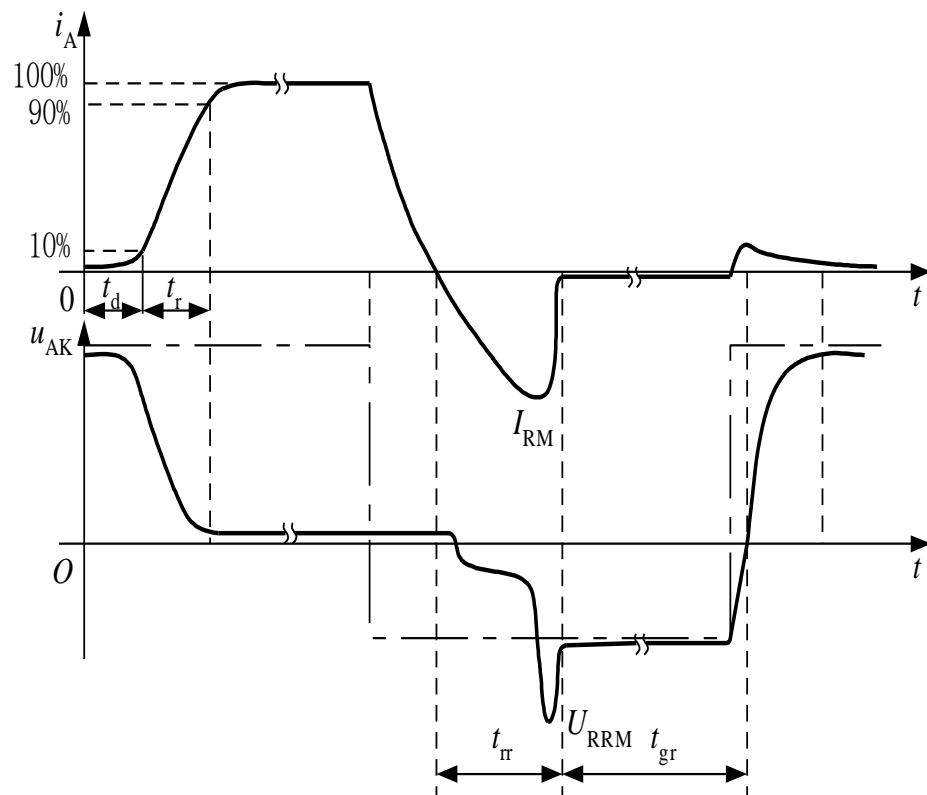
- ❖ 第I象限的是正向特性
- ❖ 第III象限的是反向特性
- ❖ 承受反向电压时，不论门极是否有触发电流，晶闸管都不会导通
- ❖ 承受正向电压时，仅在门极有触发电流的情况下晶闸管才能开通
- ❖ 晶闸管一旦导通，门极就失去控制作用
- ❖ 要使晶闸管关断，只能使晶闸管的电流降到接近于零的某一数值以下(维持电流)



伏安特性
 $I_{G2} > I_{G1} > I_G$

晶闸管的基本特性

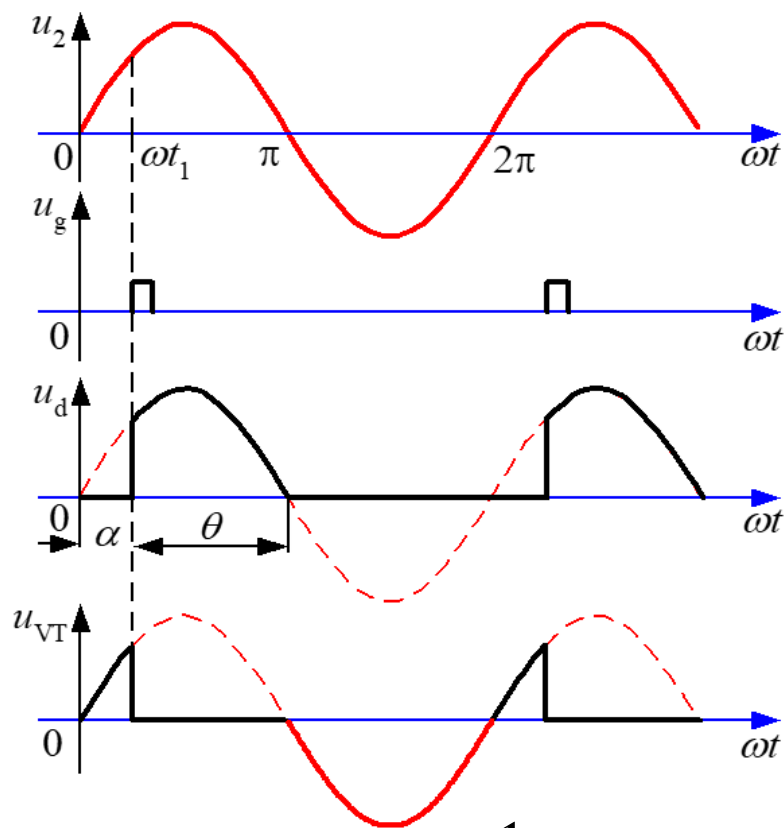
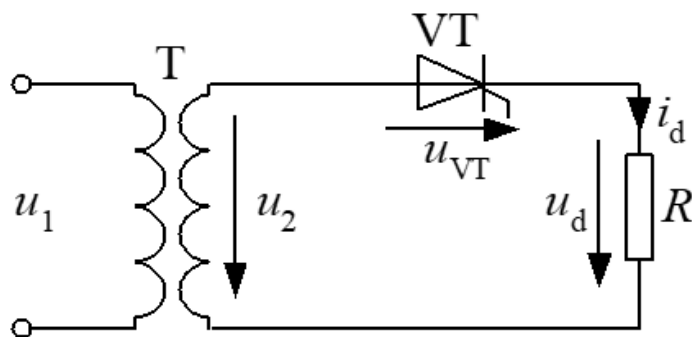
动态特性



开通关断波形

晶闸管应用举例

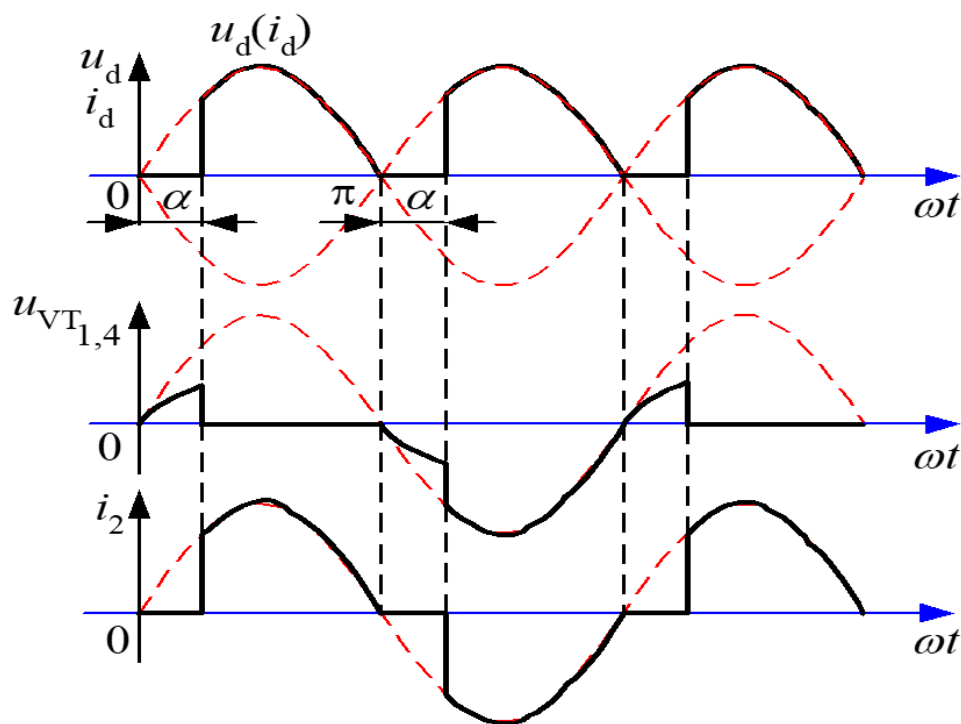
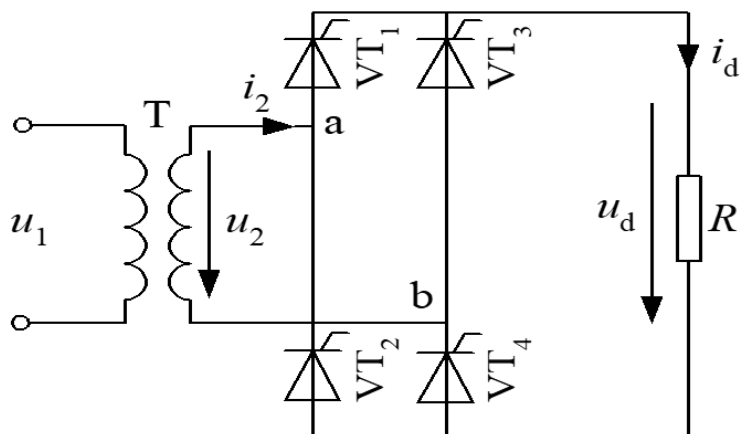
单相半波可控整流电路



$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = 0.45U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

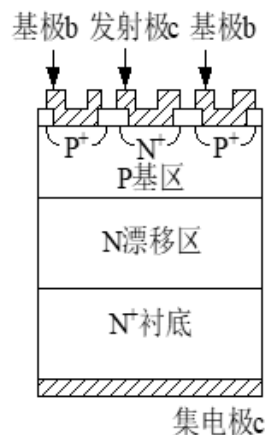
晶闸管应用举例

单相桥式全控整流电路

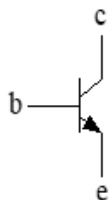


$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2} U_2}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

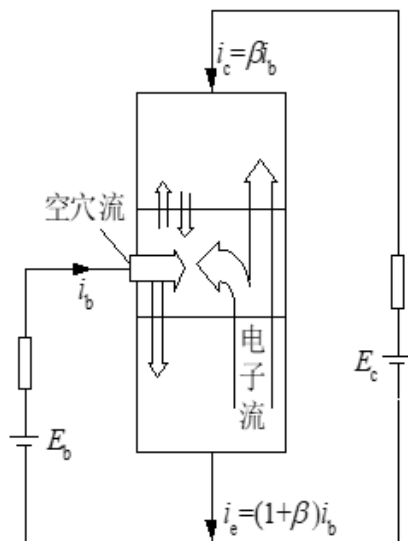
电力晶体管



a)



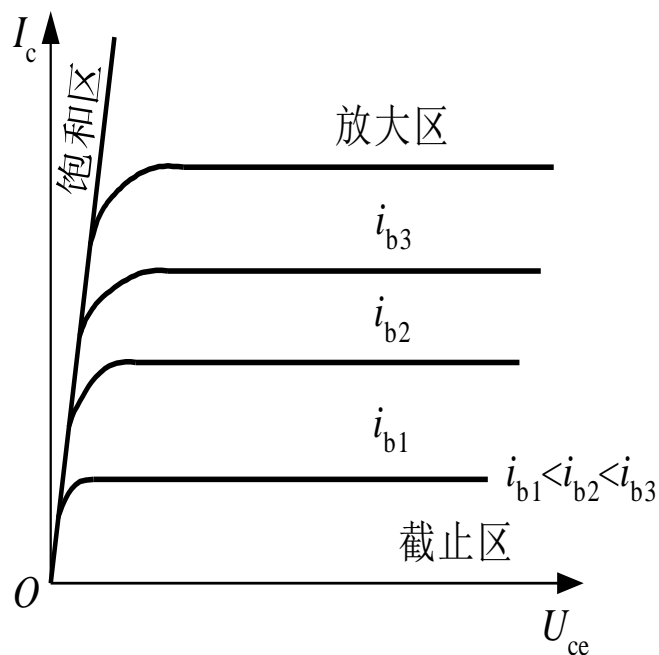
b)



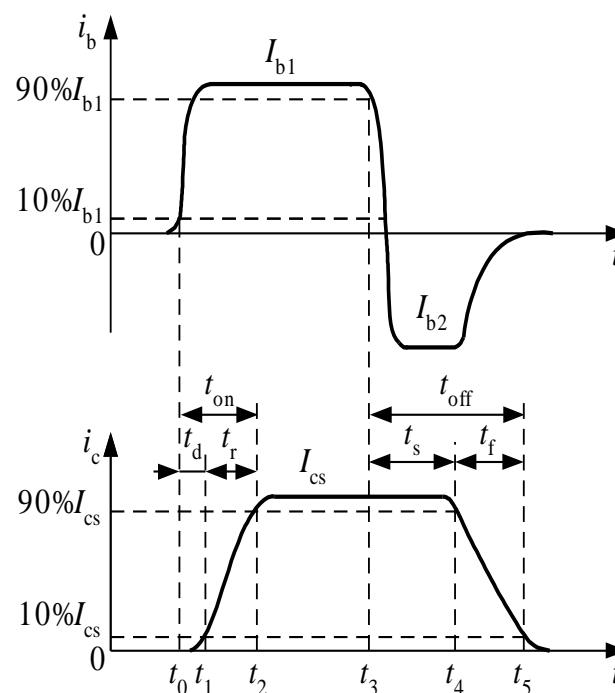
c)

- ❖ 与普通的双极结型晶体管基本原理是一样的
- ❖ 主要特性是耐压高、电流大、开关特性好
- ❖ 通常采用至少由两个晶体管按达林顿接法组成的单元结构
- ❖ 采用集成电路工艺将许多这种单元并联而成

GTR特性



共发射极接法时GTR输出特性



GTR开通关断波形

- 共发射极接法时的典型输出特性：截止区、放大区和饱和区
- 在电力电子电路中GTR工作在开关状态，即工作在截止区或饱和区
- 在开关过程中，即在截止区和饱和区之间过渡时，要经过放大区

电力晶体管参数

❖ 最高工作电压

- GTR上电压超过规定值时会发生击穿，击穿电压不仅和晶体管本身特性有关，还与外电路接法有关，实际使用时，为确保安全，最高工作电压要比基极开路时集电极和发射极之间的击穿电压 BU_{ceo} 低得多。

❖ 集电极最大允许电流 I_{cM}

- 通常规定为直流电流放大系数下降到规定值的1/2~1/3时所对应的 I_c 。实际使用时要留有裕量，只能用到 I_{cM} 的一半或稍多一点。

❖ 集电极最大耗散功率 P_{cM}

- 最高工作温度下允许的耗散功率，产品说明书中给 P_{cM} 时同时给出壳温 T_c ，间接表示了最高工作温度

GTR的二次击穿现象与安全工作区

➤ 一次击穿

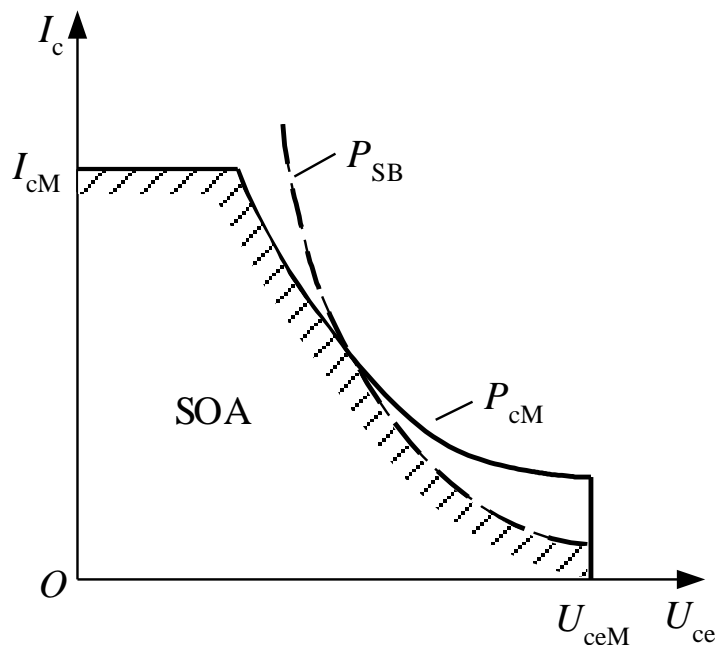
- 集电极电压升高至击穿电压时， I_c 迅速增大，出现雪崩击穿
- 只要 I_c 不超过限度，GTR一般不会损坏，工作特性也不变

➤ 二次击穿

- 一次击穿发生时 I_c 增大到某个临界点时会突然急剧上升，并伴随电压的陡然下降
- 常常立即导致器件的永久损坏，或者工作特性明显衰变

➤ 安全工作区 (Safe Operating Area——SOA)

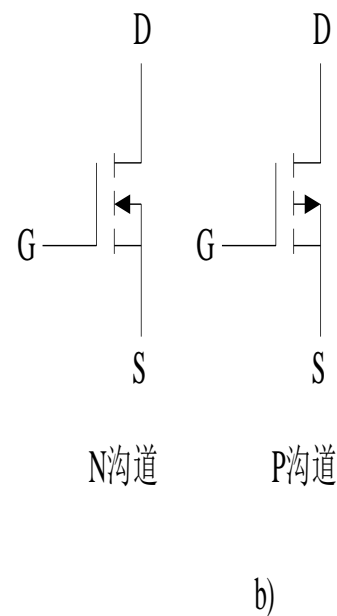
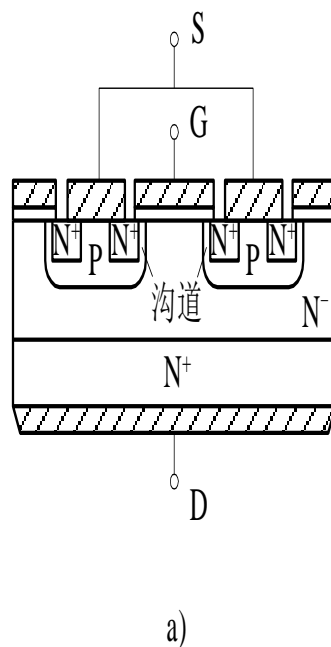
- 最高电压、集电极最大电流、最大耗散功率、二次击穿临界线限定



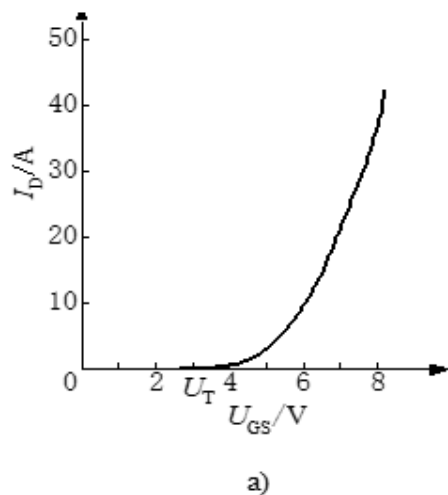
电力电子器件-MOSFET

MOSFET

- ❖ 用栅极电压来控制漏极电流
- ❖ 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，一般只适用于功率不超过10kW的电力电子装置

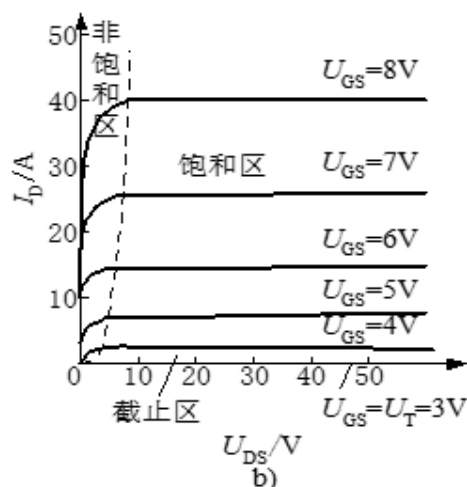


电力电子器件-MOSFET



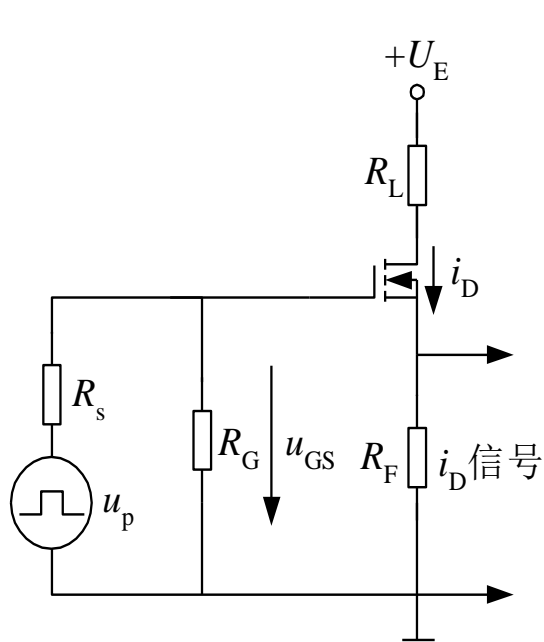
MOSFET

- ❖ 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（对应于GTR的饱和区）
- ❖ 电力MOSFET工作在开关状态，即在截止区和非饱和区之间来回转换
- ❖ 电力MOSFET漏源极之间有寄生二极管，漏源极间加反向电压时器件导通
- ❖ 电力MOSFET的通态电阻具有正温度系数，对器件并联时的均流有利

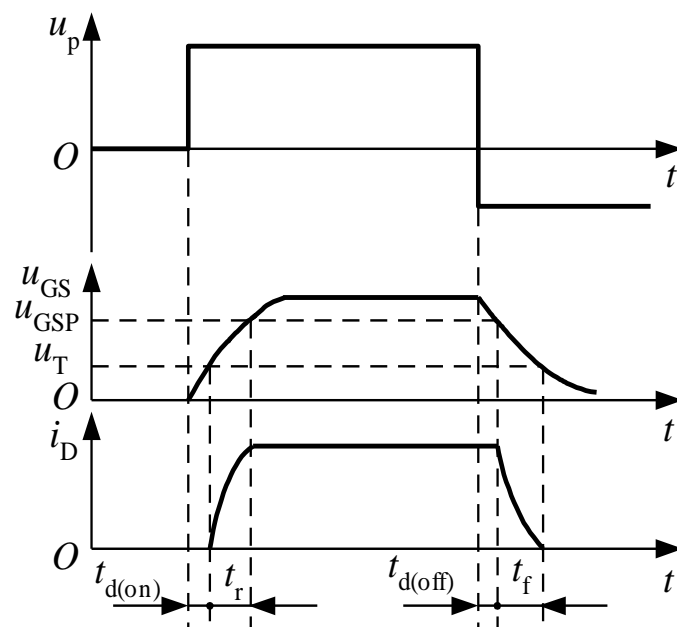


电力电子器件-MOSFET

❖ 动态特性



a)



b)

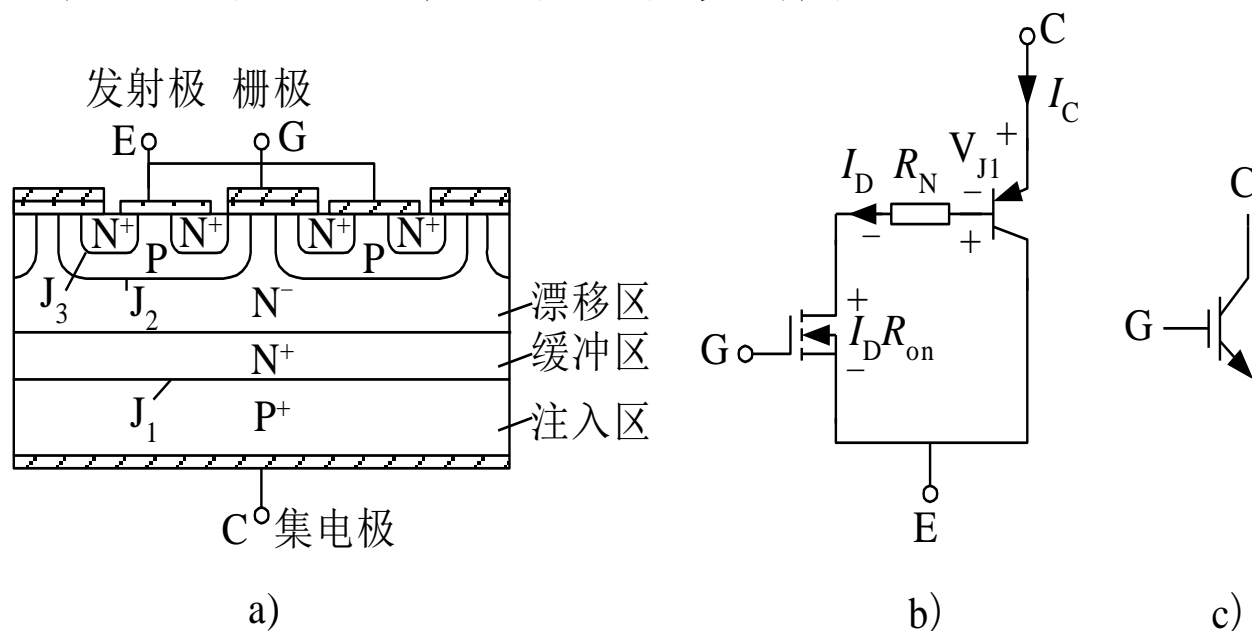
电力电子器件-IGBT

- ❖ **GTR和GTO的特点**——双极型，电流驱动，有电导调制效应，通流能力很强，开关速度较低，所需驱动功率大，驱动电路复杂。
- ❖ **MOSFET的优点**——单极型，电压驱动，开关速度快，输入阻抗高，热稳定性好，所需驱动功率小而且驱动电路简单。
- ❖ 两类器件取长补短结合而成的复合器件—**Bi-MOS器件**
- ❖ 绝缘栅双极晶体管（Insulated-gate Bipolar Transistor —IGBT或IGT）
- ❖ **GTR和MOSFET复合**，结合二者的优点，具有好的特性。
- ❖ 1986年投入市场后，取代了**GTR**和一部分**MOSFET**的市场,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，以期再取代**GTO**的地位。

电力电子器件-IGBT

IGBT

三端器件：栅极G、集电极C和发射极E



a) 内部结构断面示意图 b) 简化等效电路 c) 电气图形符号

电力电子器件-功率模块

❖ IGBT的工作原理

- 驱动原理与电力MOSFET基本相同，场控器件，通断由栅射极电压 U_{GE} 决定
- 导通：
 - U_{GE} 大于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时，MOSFET内形成沟道，为晶体管提供基极电流，IGBT导通
- 导通压降：
 - 电导调制效应使电阻 R_N 减小，使通态压降小
- 关断：
 - 栅射极间施加反压或不加信号时，MOSFET内的沟道消失，晶体管的基极电流被切断，IGBT关断

电力电子器件-功率模块

- ❖ 20世纪80年代中后期开始，模块化趋势，将多个器件封装在一个模块中，称为功率模块
- ❖ 可缩小装置体积，降低成本，提高可靠性
- ❖ 对工作频率高的电路，可大大减小线路电感，从而简化对保护和缓冲电路的要求
- ❖ 将器件与逻辑、控制、保护、传感、检测、自诊断等信息电子电路制作在同一芯片上，称为功率集成电路 (Power Integrated Circuit——PIC)

电力电子器件-功率模块

类似功率集成电路还有许多名称:

- 高压集成电路 (High Voltage IC——HVIC) 一般指横向高压器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成
- 智能功率集成电路 (Smart Power IC——SPIC) 一般指纵向功率器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成
- 智能功率模块 (Intelligent Power Module——IPM) 则专指IGBT及其辅助器件与其保护和驱动电路的单片集成, 也称智能IGBT (Intelligent IGBT)

电力电子器件现状

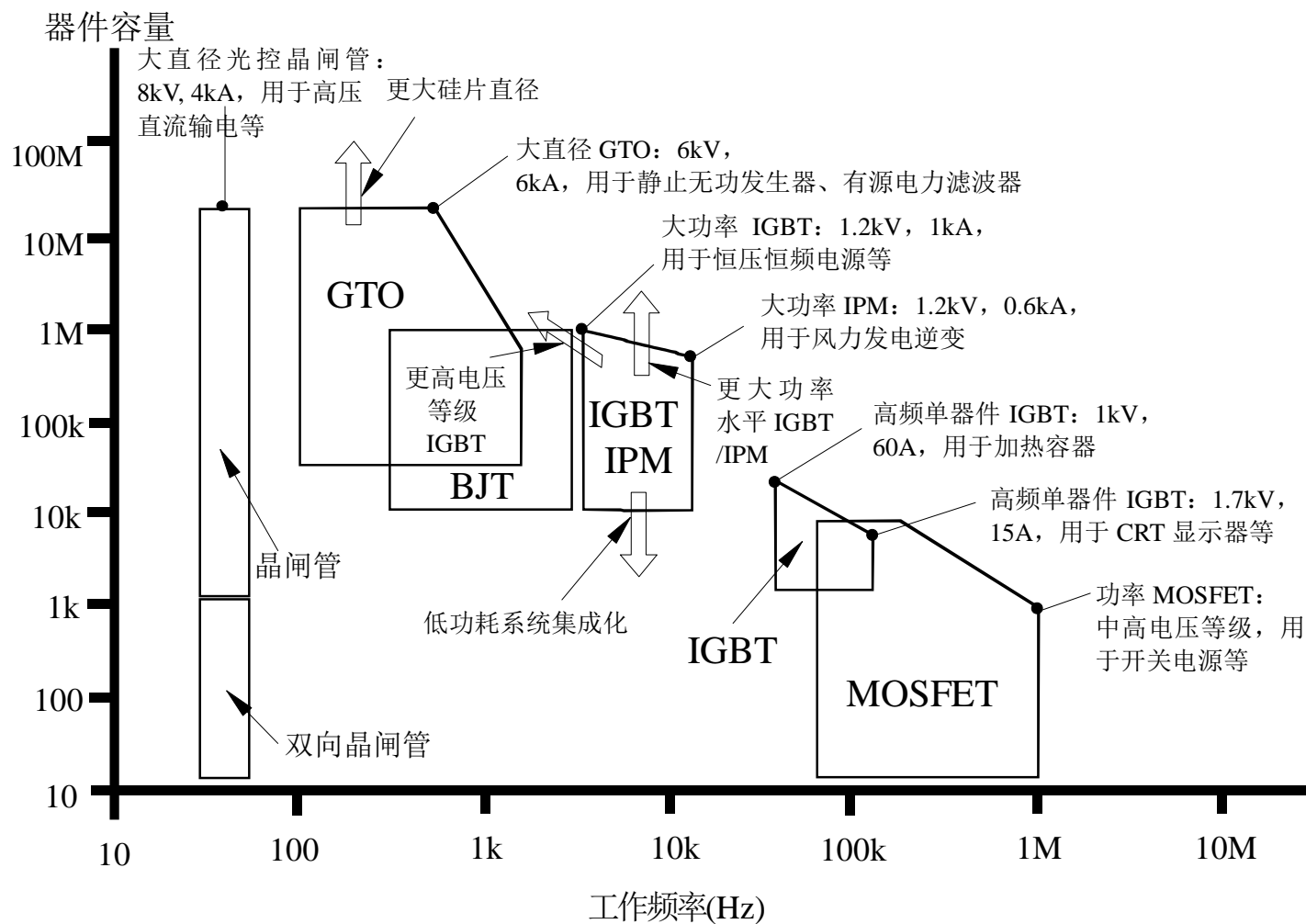






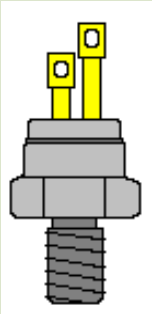

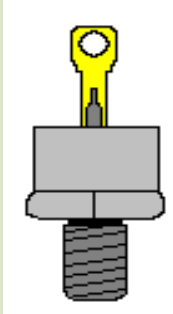
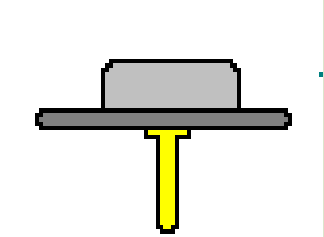



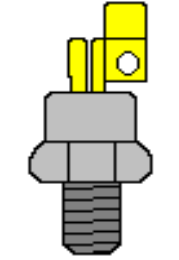
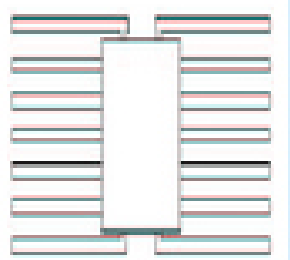
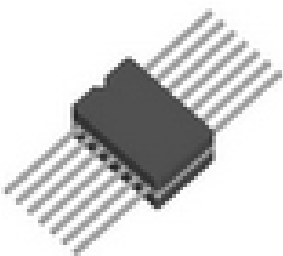
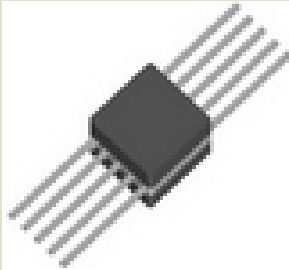
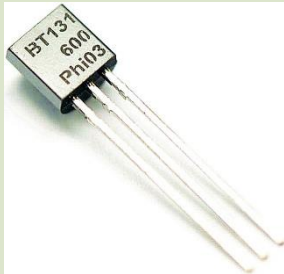
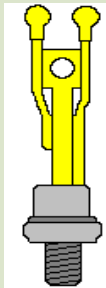

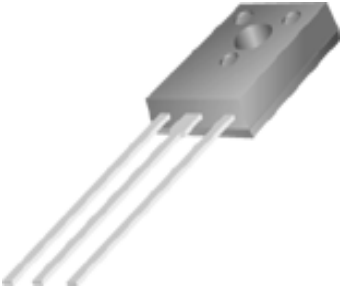
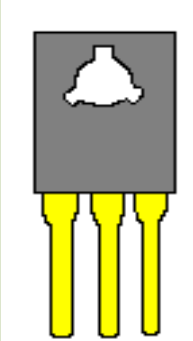

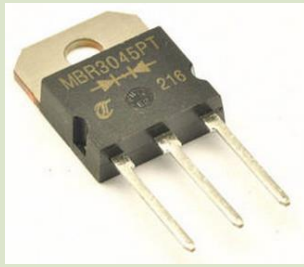

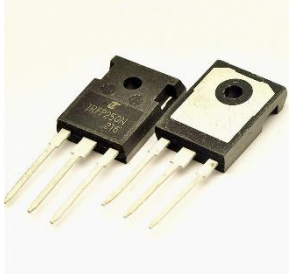

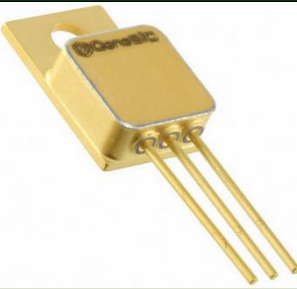




表 6.1 各种封装的接触热阻 $R_{\theta_{cs}}$

封装形式	绝 缘 垫 圈	$R_{\theta_{cs}}(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	
		有硅油	无硅油
TO-3	无绝缘垫圈	0.10	0.30
	聚四氟乙烯	0.70—0.80	1.25—1.45
	云母 (50—100 μm)	0.50—0.70	1.20—1.50
TO-66	无绝缘垫圈	0.15—0.20	0.40—0.50
	云母 (50—100 μm)	0.60—0.80	1.20—2.00
	聚脂薄膜 (50—100 μm)	0.60—0.80	1.20—1.40
TO-220AB	无绝缘垫圈	0.30—0.50	1.50—2.00
	云母 (50—100 μm)	2.00—2.50	4.0—6.0
TO-3P(L)	无绝缘垫圈	0.1—0.2	0.4—1.0
	云母 (50—100 μm)	0.5—0.7	1.2—1.5

TO-3	TO-5	TO-8	TO-18	TO-39
				 TO39
TO-46	TO-48	TO-52	TO-55	TO-65
				
TO-66	TO-72	TO-75	TO-83	TO-84
				

TO-87	TO-89	TO-92	TO-94	TO-100
				
TO-126	TO-127	TO-202	TO-218	TO-220
				
TO-247	TO-254	TO-257	TO-264	TO-276
				

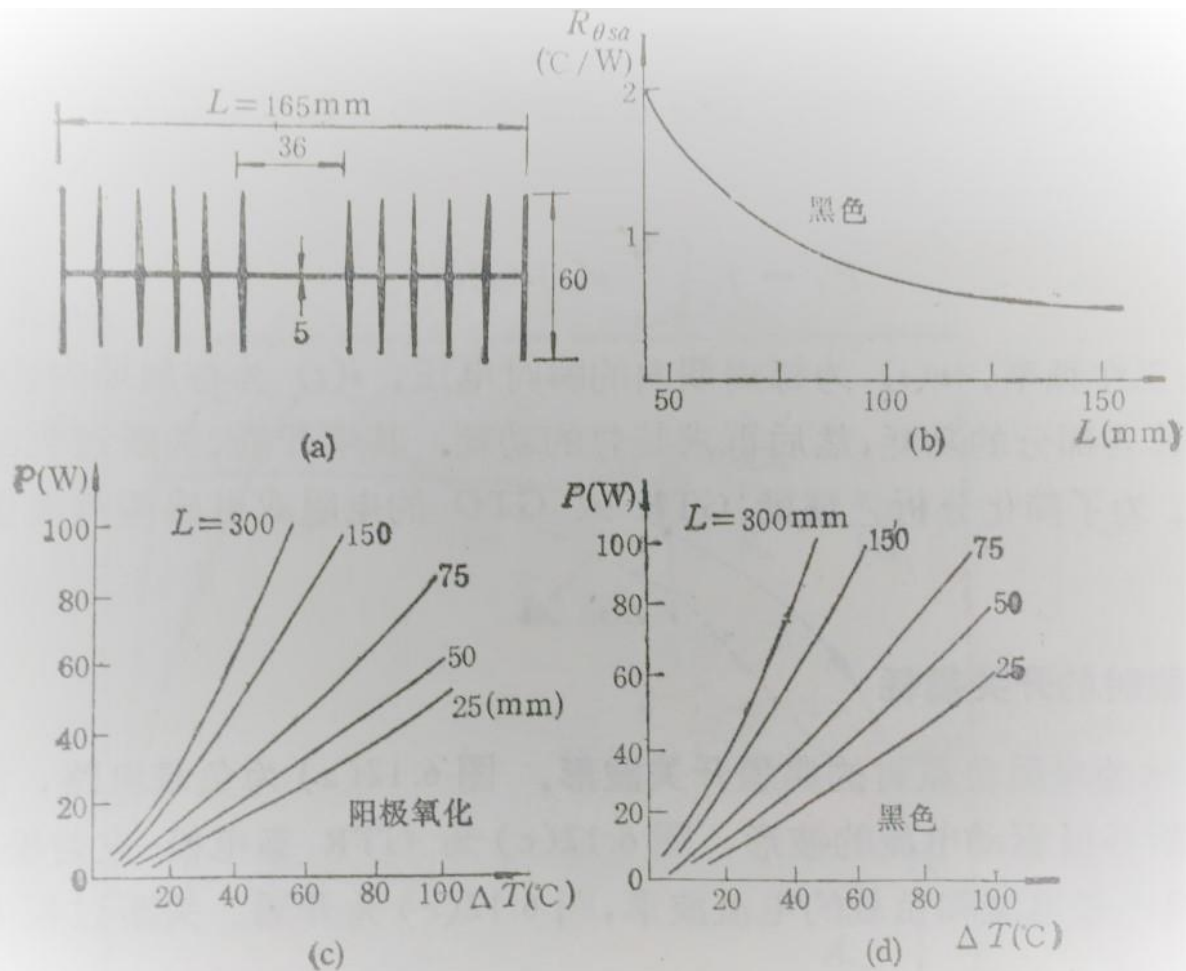
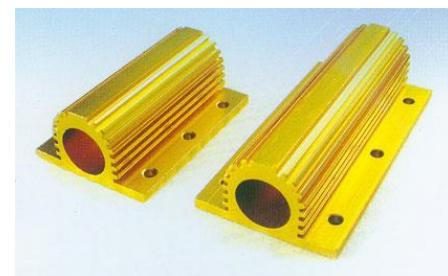
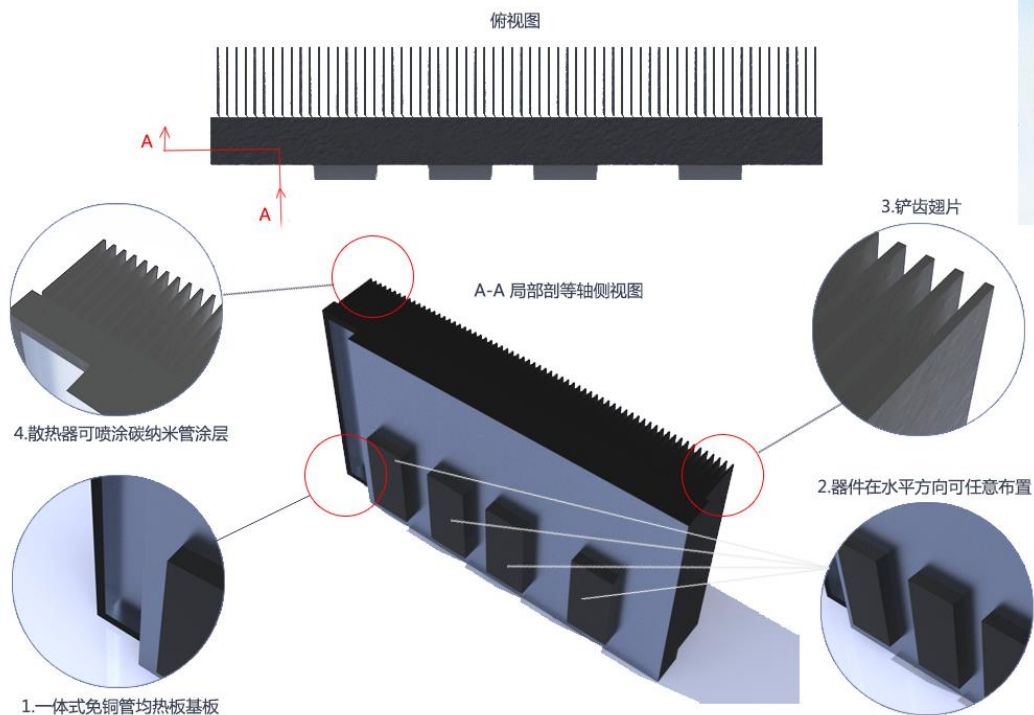
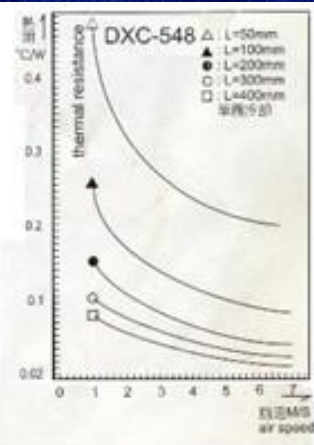
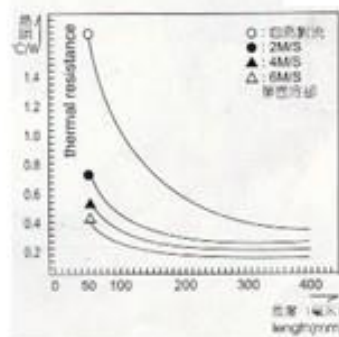


图 6.10 散热器的典型数据

DXC-548



Thank You !

伊国兴

ygx@hit.edu.cn

