



第二篇 电力电子电路基础

主要内容

第2章 电力电子器件基础

- 2.0 电力电子技术概述
- 2.1 电力电子器件概述
- 2.2 不可控器件及典型应用
- 2.3 全控型器件及典型应用

第3章 基本电力电子电路

- 3.0 概述
- 3.1 AC-DC整流电路
- 3.2 DC-DC直流-直流变换电路
- 3.3 DC-AC逆变电路

第4章 实用化电力电子装置

- 4.0 概述
- 4.1 全控器件的驱动电路
- 4.2 电力电子装置的保护
- 4.3 电力电子装置的控制

涉及的工程问题

- 基本器件原理与特性
- 典型电力电子变换电路
- 电力电子器件驱动/保护



第2章 电力电子器件基础

主要内容

- 概述 电力电子技术，电力电子器件的概念、分类；
- 介绍常用电力电子器件（工作原理、外特性、动态过程、主要参数）及其典型应用

目录

2.0 电力电子技术概述

2.1 电力电子器件概述

2.2 不可控器件及典型应用

2.3 全控型器件及典型应用

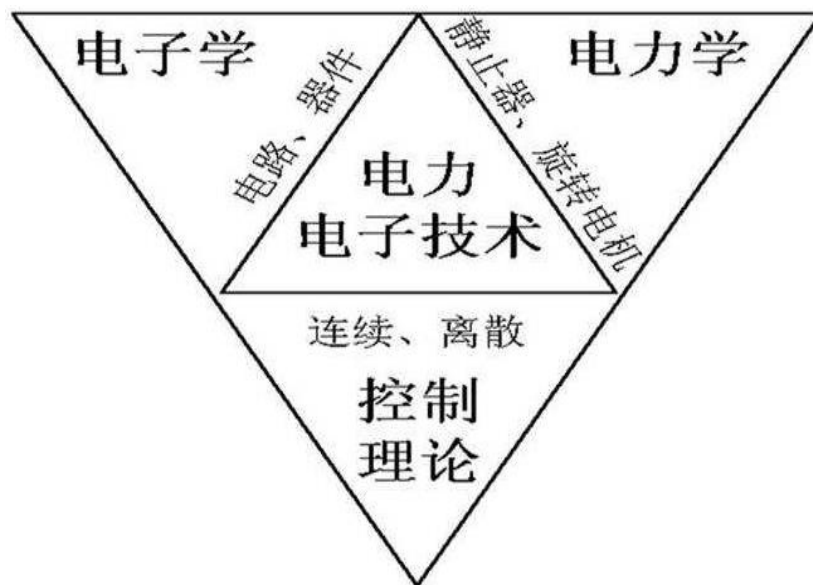
教参：王兆安《电力电子技术》（第5版）：第1章, 2.1,2.2,2.4节



2.0 电力电子技术概述

■ 电力电子学 (Power Electronics)

- ✓ 使用**电力电子器件**对电能进行变换和控制的学科
- ✓ 1974 年, 美国学者 W. Newell (威廉·纽厄尔) 首次提出电力电子技术的定义, 并用 **“倒三角”** 图表示其学科交叉的内涵: 电力电子技术是由**电子学**、**电力学 (电气工程)** 及**控制理论**组成的交叉学科





2.0 电力电子技术概述

■ 电力电子技术的发展历史（由器件发展推动）

- ✓ 1904年，真空二极管，Fleming（英国）
- ✓ 1907年，真空三极管，Forest Lee（美国）
- ✓ 1947年，晶体管（Ge锗），贝尔实验室
- ✓ 1950s，电力二极管（Ge锗），贝尔实验室
- ✓ 1957年，半控器件（Si硅），晶闸管（美国GE）
- ✓ 1970s，全控器件（Si硅），门级可关断晶闸管/GTO，电力晶体管/BJT，电力场效应管/Power MOSFET
- ✓ 1980s，绝缘栅极双极型晶体管/IGBT（Si硅）
- ✓ 2000s，基于宽禁带半导体材料（SiC/GaN）的MOSFET、IGBT



2.0 电力电子技术概述

■ 电力电子技术 VS. 信息电子技术

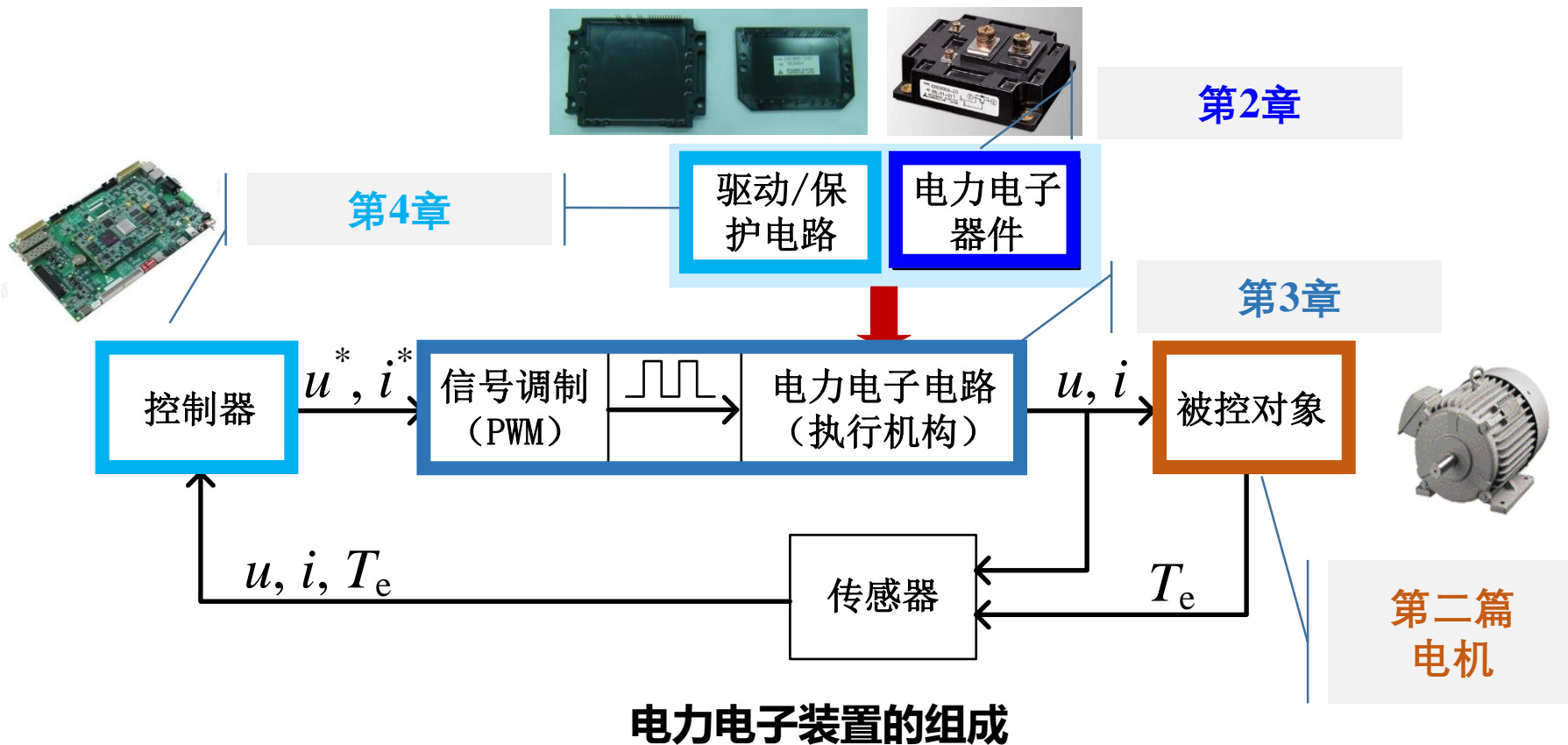
- ✓ 处理的对象**不同**：能量（电力）VS. **信息**，电力电子器件需专门的驱动电路，对开关信号放大后再用于控制器件的导通和关断，即**弱电控制强电**
- ✓ 关注的性能指标**不同**：电力电子关注输出功率、效率、波形质量；**信息电子关注放大倍数（运算精度）、输入输出电阻、通频带等**
- ✓ 器件的工作方式**不同**：电力电子器件主要工作在开关状态，**信息电子器件主要工作在放大状态**
- ✓ 分析方法**不同**：电力电子采用大信号分析，器件开/关→输入输出波形；**信息电子采用小信号分析，基于交变等效电路模型研究输入输出关系**
- ✓ 研究方法**相似**：器件→基本电路→实用化系统→引入反馈控制



2.0 电力电子技术概述

■ 电力电子装置

- ✓ 使用电力电子器件对电能进行变换和控制的系统





2.0 电力电子技术概述

■ 电力电子装置的分类 (按电能变换种类)

输出 \ 输入	交流AC	直流DC
	直流DC	交流AC
直流DC	整流/ AC-DC	直流-直流变换/ DC-DC
交流AC	变频、变相/ AC-AC	逆变/ DC-AC

■ 对电力电子装置的基本要求

- ✓ 高效率：电力电子器件工作在开关（饱和导通/截止）状态
- ✓ 高功率密度：复合管/达林顿管（高耐压、大电流）、低损耗
- ✓ 高质量（波形）：高开关频率、无源滤波



2.1 电力电子器件概述

2.1.1 概念和特征

2.1.2 电力电子器件的分类

2.1.3 本章内容和学习要点

教参：王兆安《电力电子技术》（第5版）：第2.1节



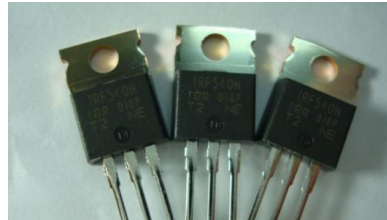
2.1 电力电子器件概述

2.1.1 概念

- **电力电子器件** (Power Electronic Device)
可直接用于**电能变换或控制的电子器件**



电力二极管



电力MOSFET



IGBT

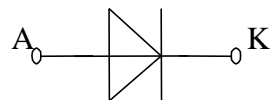
Note: 需安装散热器!
昂贵, 需附加保护电路!



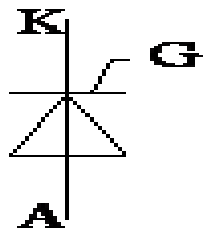
2.1.2 电力电子器件的分类

1、按照能够被控制电路信号所控制的程度

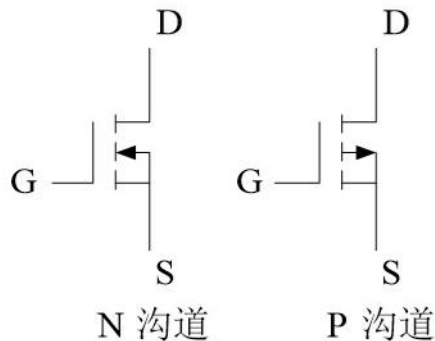
- **不可控器件** 电力二极管 (Power Diode)
 - ✓ 不能通过外部控制信号控制其通断
- **半控型器件** 晶闸管 (Thyristor) 及其派生器件
 - ✓ 可通过外部控制信号控制其开通, 但不能控制其关断
- **全控型器件** Power MOSFET, IGBT等
 - ✓ 通过外部控制信号既可以控制其开通, 又可以控制其关断



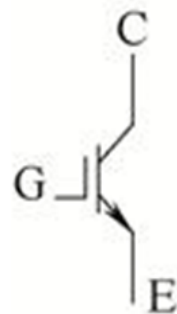
电力二极管



晶闸管



电力MOSFET



IGBT

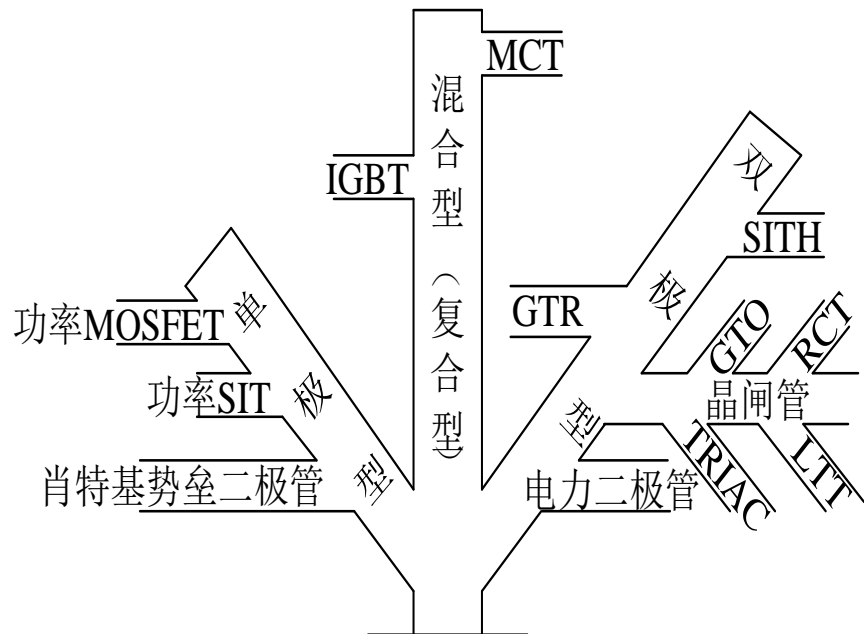


2、按照驱动信号的性质

- **电流驱动型**——从控制端注入/抽出电流实现开关控制
- **电压驱动型**——在控制端-公共端间施加电压信号实现开关控制

3、按照载流子参与导电情况

- **单极型器件**：一种载流子（自由电子或空穴）参与导电，如场效应管MOSFET
- **双极型器件**：自由电子和空穴两种载流子参与导电，如晶体管 BJT
- **复合型器件**：由单极型和双极型器件复合而成（复合管/达林顿结构），如IGBT





2.1.3 本章内容和学习要点

本章内容

从使用的角度，按照不可控、半控型、典型全控型器件的顺序，介绍各种电力电子器件的**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

学习要点

- 熟悉 器件**基本工作原理和基本特性**
- 了解 器件的**参数和特性曲线**
- 实际应用时，器件选择所需的基本内容
 - ✓ 类型：如高频/低频，高压/低压等
 - ✓ 静态参数：开关频率/控制特性/额定值等
 - ✓ 安全工作区（静态）：正向电流/反向耐压
 - ✓ 动态参数：开通/关断时间等



2.2 不可控器件及典型应用

2.2.1 电力二极管的结构

2.2.2 电力二极管的工作原理及伏安特性

2.2.3 电力二极管的动态特性

2.2.4 电力二极管的主要参数

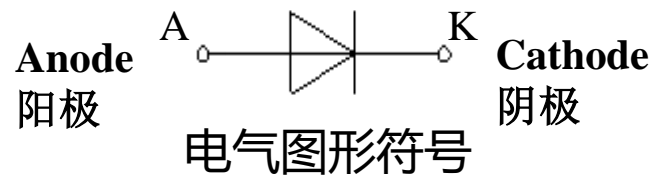
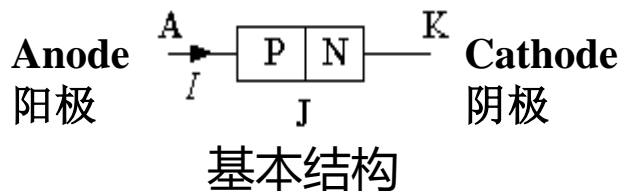
2.2.5 典型应用：不控整流电路

教参：王兆安《电力电子技术》（第5版）：第2.2节



2.2.1 电力二极管的结构

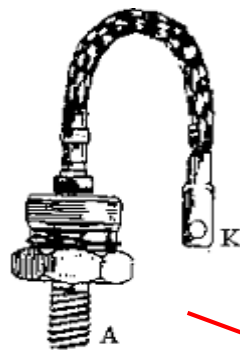
■ **结构：将PN结封装，引出两个电极，构成电力二极管**



小功率管



中功率管



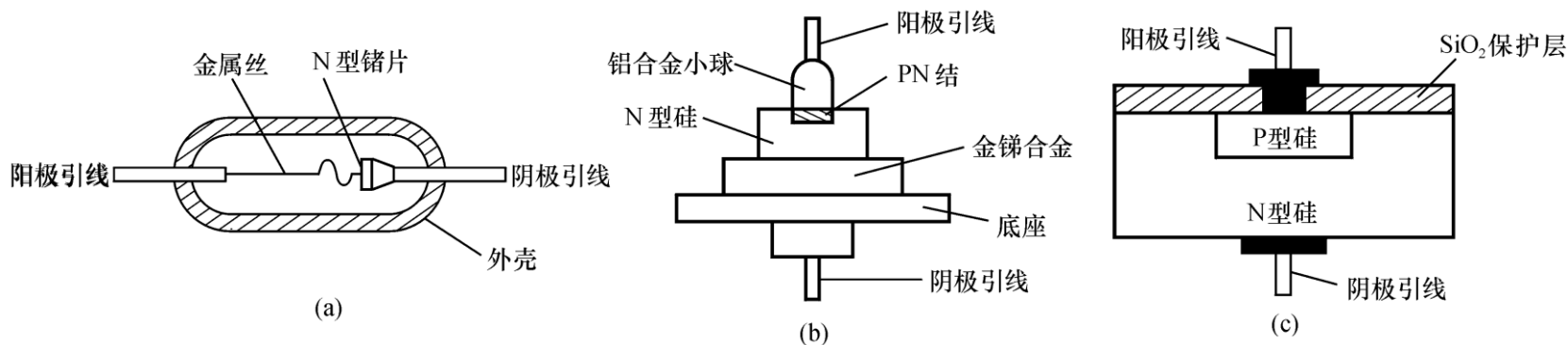
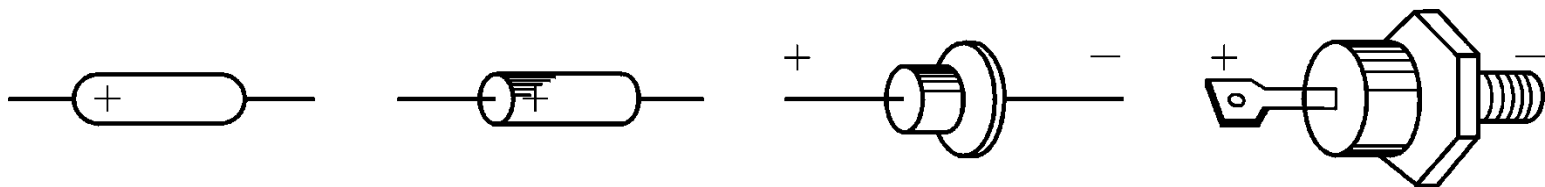
大功率二极管

✓ 外形（封装）不同：螺栓型、平板型等



2.2.1 电力二极管的结构

■ **分类：**根据应用场合，有普通、快恢复、肖特基二极管



点接触型：结面积小，结电容小，故结允许的电流小，最高工作频率高

面接触型：结面积大，结电容大，故结允许的电流大，最高工作频率低

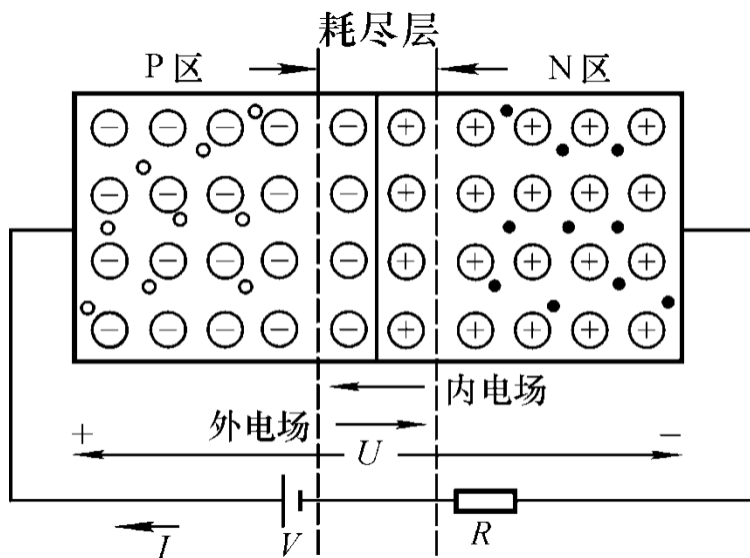
平面型：结面积可小、可大，小的工作频率高，大的结允许的电流大

✓ **结构不同**



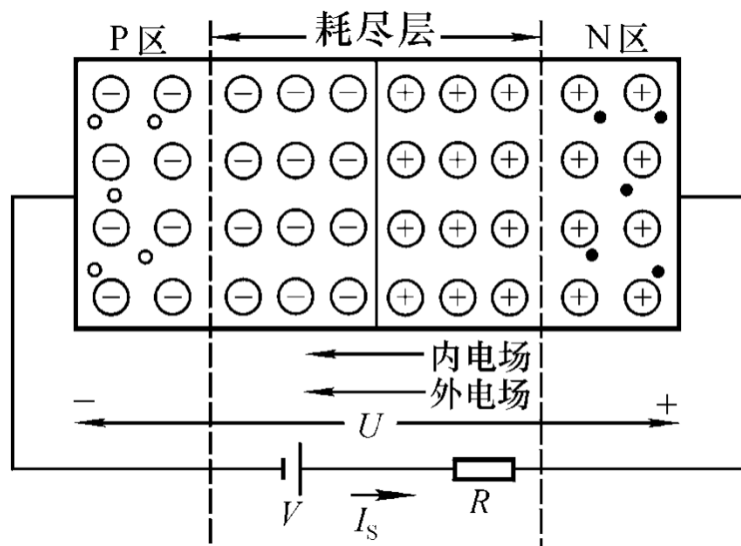
2.2.2 电力二极管的工作原理及伏安特性

■ PN 结的单向导电性



正向偏置 (PN结加正向电压):

- ✓ 扩散运动加剧, 耗尽层变窄
- ✓ 呈现小电阻, 扩散电流大
- ✓ PN结处于导通状态

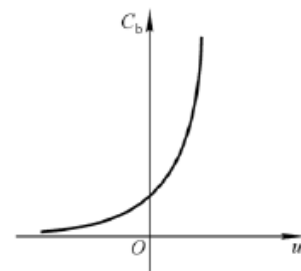
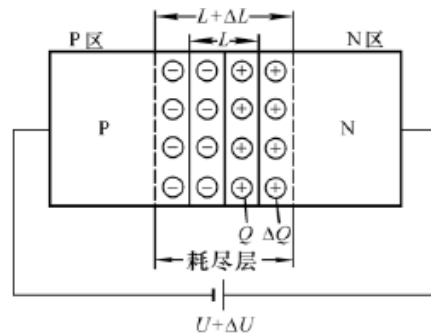


反向偏置 (PN结加反向电压):

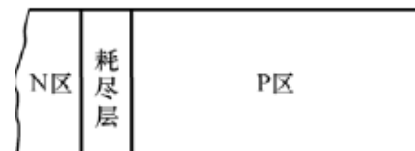
- ✓ 漂移运动加剧, 耗尽层变宽
- ✓ 呈现大电阻, 反向饱和 (漂移) 电流小
- ✓ PN结近似为截止状态

■ PN 结的电容效应

- ✓ 空间电荷区的宽度随PN结外加电压而变化，伴随电荷的积累和释放，等效得到的电容



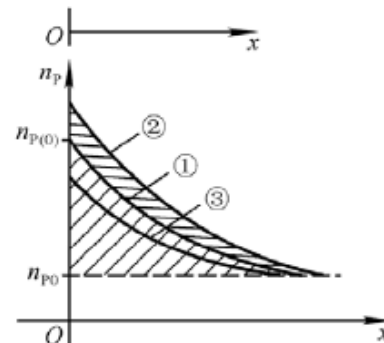
✓ PN结正向偏置时，扩散路程中载流子浓度的梯度随外加电压而变化，伴随电荷的积累和释放，等效得到的电容



结电容:

$$C_j = C_b + C_d$$

**1~几百pF,
非常量!**



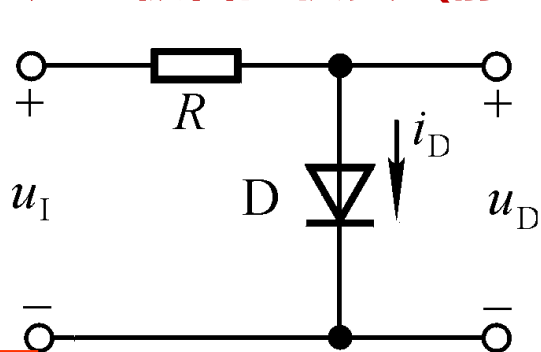
- ✓ 正向偏置以 C_d 为主，反向偏置以 C_b 为主
- ✓ PN结外加高频电压时，失去单向导电性

✓ 高频时影响开关电路的重要参数



2.2.2 电力二极管的工作原理及伏安特性

■ 电力二极管的伏安（静态）特性：其电流与端电压的关系



反向漏
电流

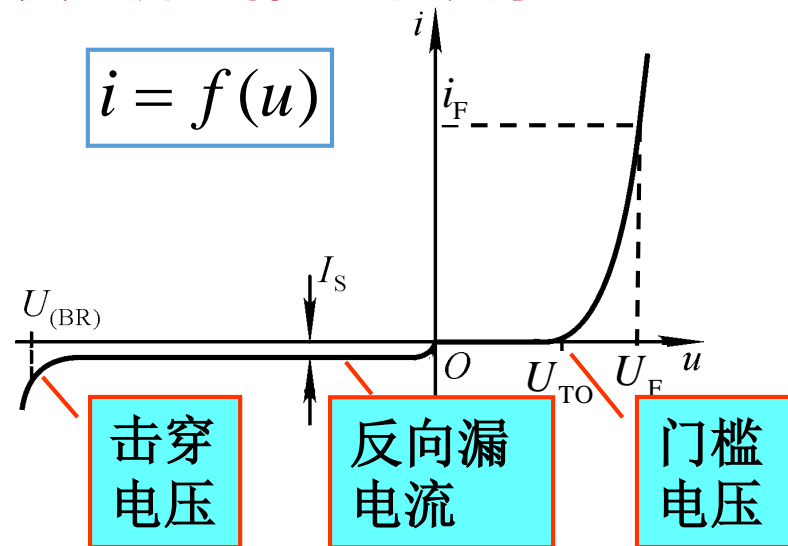
$$i = I_S \left(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1 \right)$$

二极管
端电压

$$U_T = kT/q$$

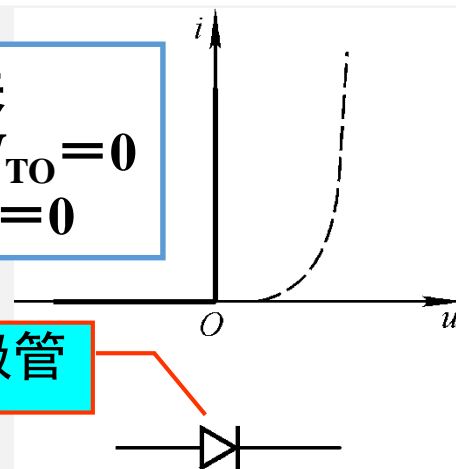
温度电压当量
(常温27°C时为
26mV)

✓ 因处理大信号,
可采用理想折
线等效特性



理想开关
开通时 $U_{TO}=0$
关断时 $I_S=0$

理想二极管





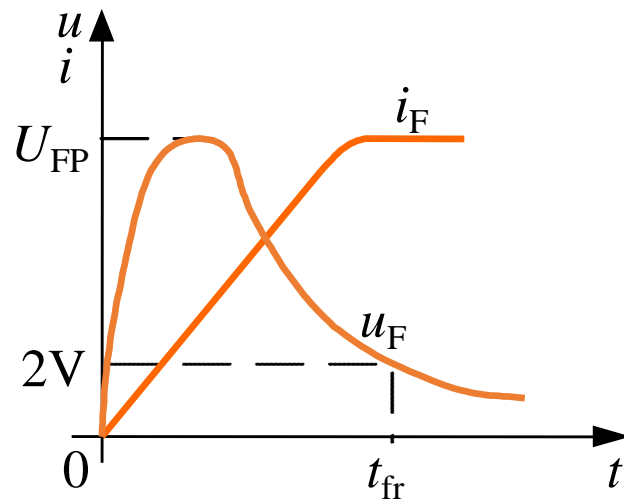
2.2.3 电力二极管的动态特性

■ 开通过程

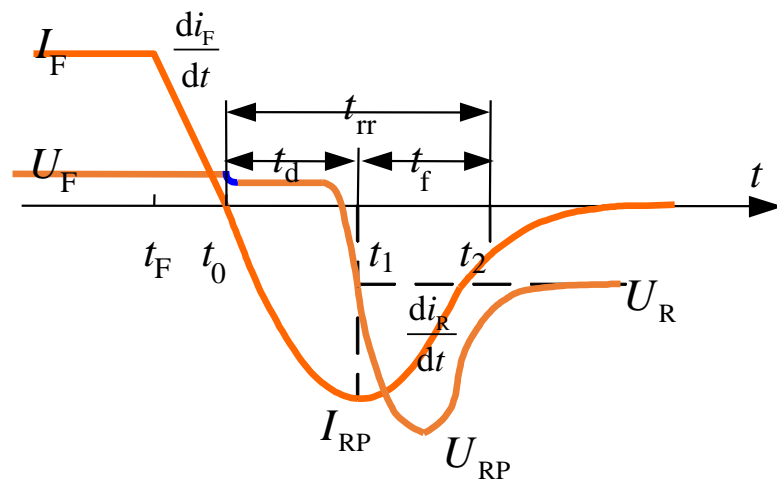
- ✓ 克服耗尽层内电场，扩散运动加剧
- ✓ 耗尽层变窄，电流增大，趋于稳定
- ✓ 正向压降先增大到 U_{FP} ，后减小，一段时间后趋于稳态值（如 2 V）
- ✓ 正向恢复时间 t_{fr}

■ 关断过程

- ✓ 扩散运动减缓，电流 i_F 减小，直到零
- ✓ 漂移运动加剧，反向电流先增大后减小，反向电压延迟 t_d 后，在回路电感作用下，先增大后减小
- ✓ 反向恢复时间： $t_{rr} = t_d + t_f$ （延迟 t_d + 下降 t_f ）



a) 零偏置转换为正向偏置



b) 正向偏置转换为反向偏置
图. 电力二极管的动态过程波形



2.2.4 电力二极管的主要参数

1、**正向平均电流 $I_{F(AV)}$** : 最大正向**工频正弦半波**电流的**平均值**

✓ 按电流**发热效应**定义, 非工频正弦, **按有效值相等原则**选取并留一定裕量

2、**正向压降 U_F** : 温度和稳态正向电流一定时的正向压降, 决定开通损耗

3、**反向重复峰值电压 U_{RRM}** : 能重复施加的反向最高峰值电压, = **2/3**击穿电压

✓ 选择时, 通常留**两倍**裕量

4、**最高工作结温 T_{JM}** : PN结不致损坏前提下, 所能承受的最高平均温度, 通常为125 ~ 175°C, 散热设计时需考虑

5、**反向恢复时间 t_{rr}** (见动态特性, 高频场合重要)

6、**浪涌电流 I_{FSM}** : 所能承受最大连续一个或几个工频周期的**过电流**

- ✓ 参数选取: 首先是1、3, 其次是其他参数,
如: 低压整流: 2 重要; 高温环境: 4 重要
- ✓ 注意散热条件!

了解

几种典型二极管的主要参数

参数	普通二极管	快恢复二极管 (FRD)	超快恢复二极管 (UFRD)	硅肖特基二极管 (Si-SBD)	砷化镓肖特基二极管 (GaAs-SBD)
正向导通压降 U_F / V *	1.2 ~ 1.4	1.2 ~ 1.4	0.9 ~ 1	0.4 ~ 0.6	1 ~ 1.5
反向恢复时间 t_{rr} / ns	1000	200 ~ 750	25 ~ 100	10	5 ~ 10
反向耐压 U_{RRM} / V	50 ~ 几 k	50 ~ 1200	50 ~ 1200	15 ~ 200	150 ~ 350
频率范围	50 ~ 400 Hz	20 ~ 100 kHz	200 kHz	1 MHz	> 1 MHz
主要用途	工频整流	高频整流	高频整流	高频整流	高频整流

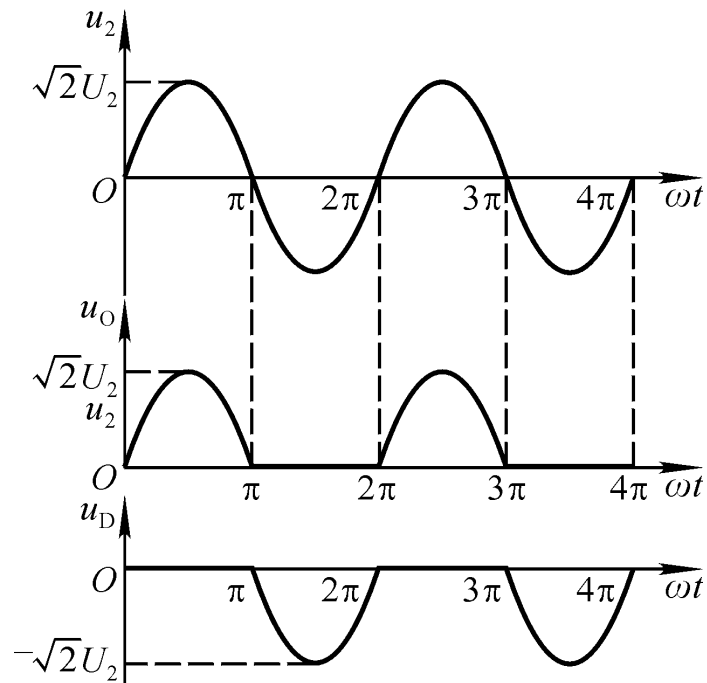
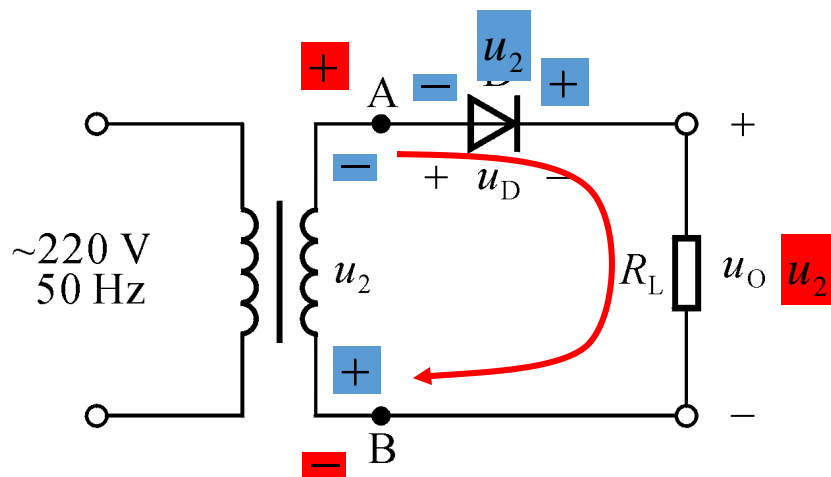
*：通过相同电流时， $I_{F(AV)}$ 较大的二极管，其正向压降 U_F 相对较小，通态损耗亦较低



2.2.5 典型应用：不控整流电路

■ 单相半波整流电路

✓ 工作原理：纯电阻负载



u_2 的正半周，D导通， $A \rightarrow D \rightarrow R_L \rightarrow B$ ， $u_O = u_2$

u_2 的负半周，D截止，承受反向电压，为 u_2 ； $u_O = 0$

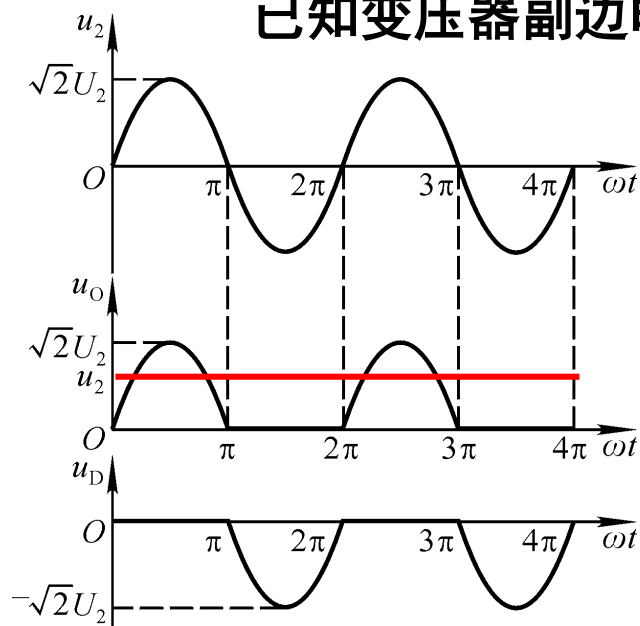


2.2.5 典型应用：不控整流电路

■ 单相半波整流电路

✓ $U_{O(AV)}$ 和 $I_{L(AV)}$ 的估算

已知变压器副边电压有效值为 U_2



$$U_{O(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$U_{O(AV)} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.45U_2$$

$$I_{L(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} \approx \frac{0.45U_2}{R_L}$$

✓ 电力二极管的选择

考虑到电网电压波动范围为 $\pm 10\%$ ，
二极管的极限参数应满足：

$$\begin{cases} I_F > 1.1 \times \frac{0.45U_2}{R_L} \\ U_R > 1.1\sqrt{2}U_2 \end{cases}$$

2.3 全控型器件及典型应用

2.3.1 电力晶体管：结构、原理、特性、参数

2.3.2 电力场效应管：结构、原理、特性、参数

2.3.3 绝缘栅双极晶体管：结构、原理、特性、参数

2.3.4 典型应用：Buck DC-DC直流斩波电路

教参：王兆安《电力电子技术》（第5版）：第2.4.2~2.4.4节



2.3.1 电力晶体管 GTR

GTR (giant transistor) 双极结型晶体管巨型晶体管, 又称 BJT

1 结构

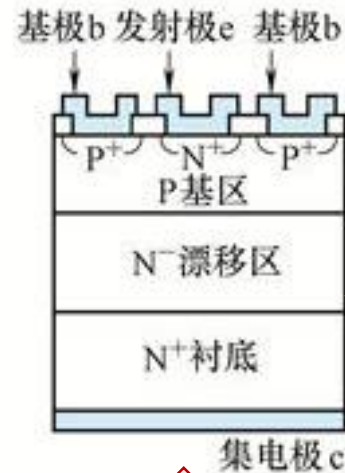
- 结构与BJT类似, 多采用NPN结构, “N-, N+” 部分用于提高反向耐压

为什么有孔?

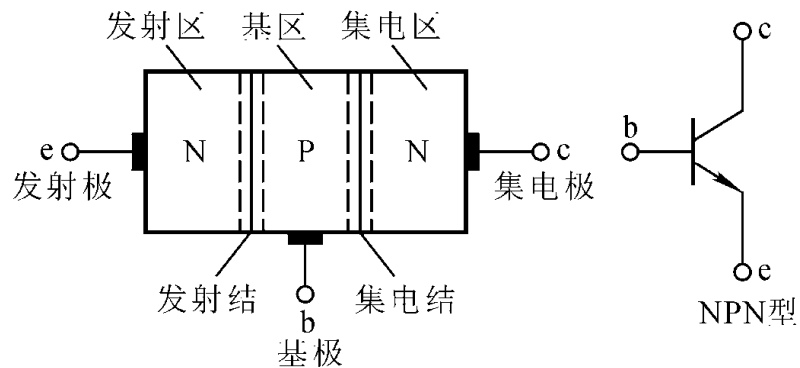
中功率管

大功率管

集电极



+表示高掺杂浓度,
-表示低掺杂浓度



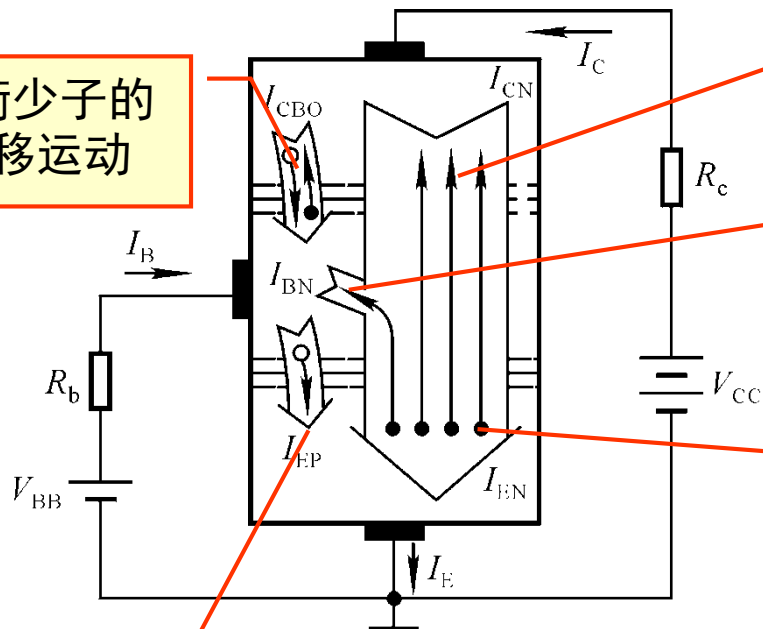


2.3.1 电力晶体管 GTR

2 特征

- 应用中一般采用共射接法，表现为 i_b 对 i_c 的控制能力（**电流驱动型**）

✓ 定义GTR交流**电流放大系数** $\beta = i_c / i_b$



平衡少子的
漂移运动

因集电区面积大，在外电场作用下大部分
扩散到基区的电子漂移到集电区

因基区薄且多子浓度低，使扩散到基区的电
子（非平衡少子）中的极少数与空穴复合

因发射区多子浓度高使大量电子从发射区
扩散到基区

基区空穴的
扩散

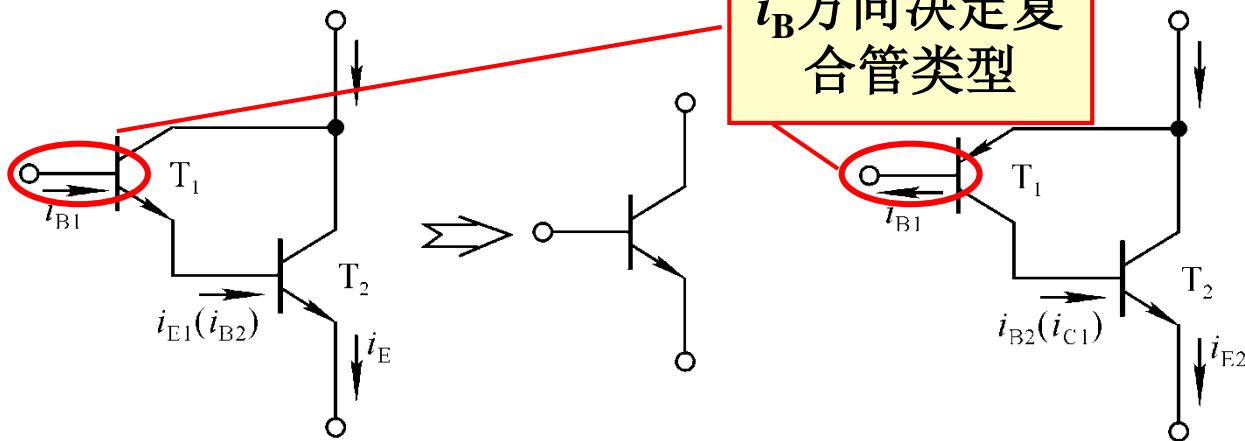
✓ 扩散运动形成发射极电流 I_E ，复合运动形成基极电流 I_B ，漂移运
动形成集电极电流 I_C ， $I_E = I_C + I_B$



2.3.1 电力晶体管 GTR

2 特征

- 应用中一般采用共射接法，表现为 i_b 对 i_c 的控制能力（**电流驱动型**）
- 单管GTR的 β 较小，通常为10左右，为实现耐高压、大电流输出，通常采用复合管（达林顿管）、多管并联使用



$$i_E = i_{B1}(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)$$

$$\beta \approx \beta_1 \beta_2$$

✓ 不同类型的管子复合后，其类型决定于T1管

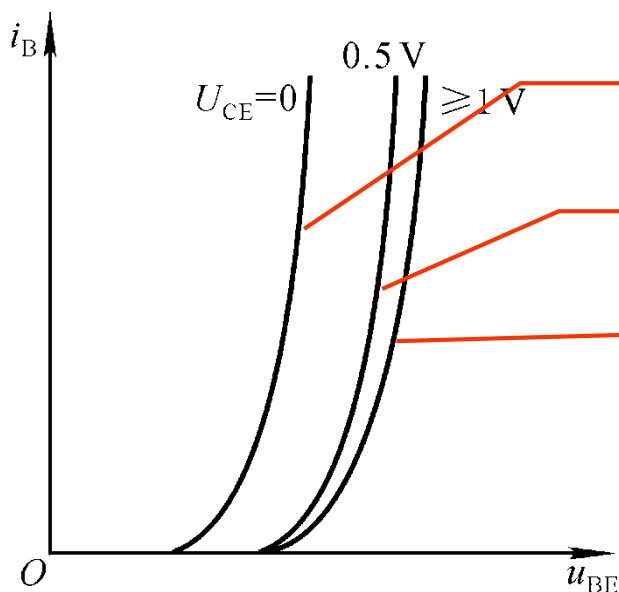
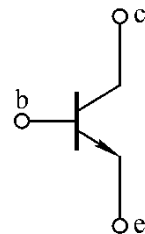


2.3.1 电力晶体管 GTR

3 静态特性

- **输入特性：**与二极管伏安特性相似

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{U_{CE}}$$



为什么像PN结的伏安特性？

为什么 U_{CE} 增大曲线右移？

为什么 U_{CE} 增大到一定值曲线右移就不明显了？

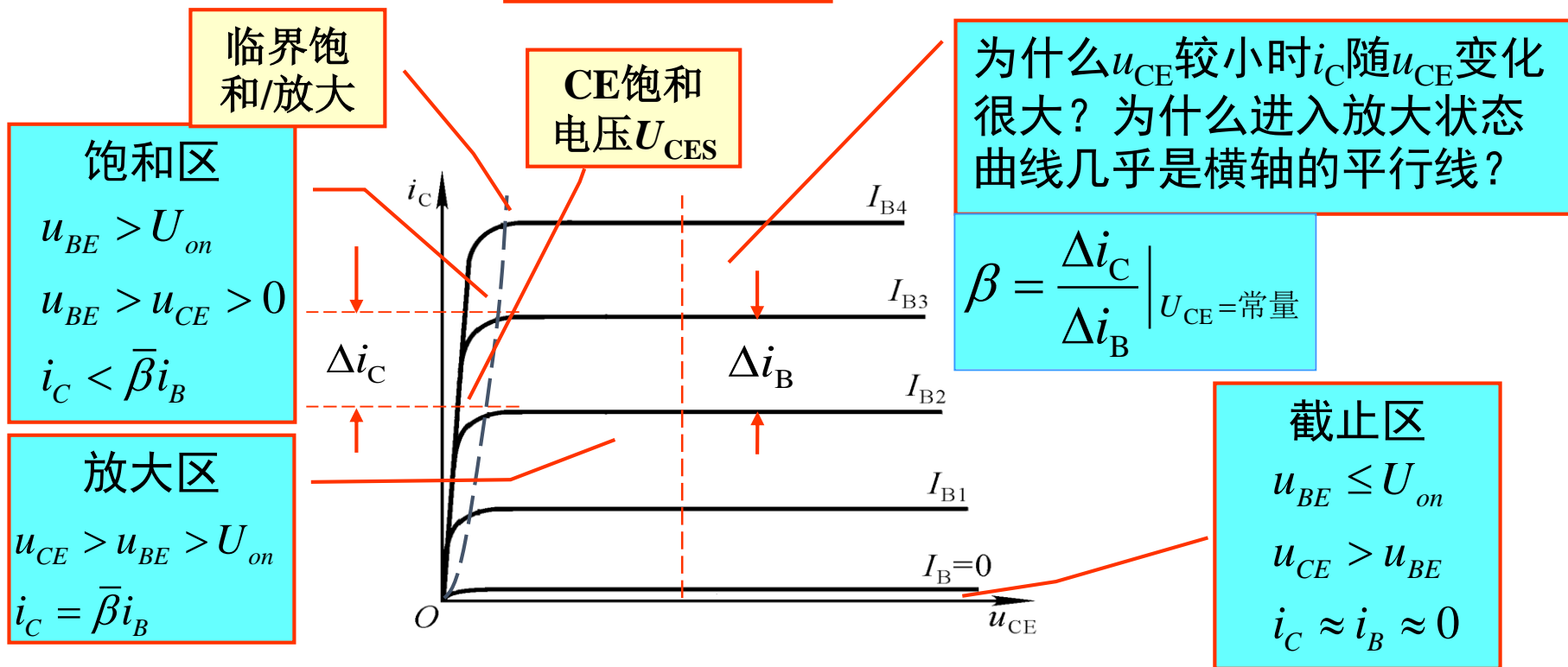


2.3.1 电力晶体管 GTR

3 静态特性

■ 输出特性：三个区

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{I_B}$$





2.3.1 电力晶体管 GTR

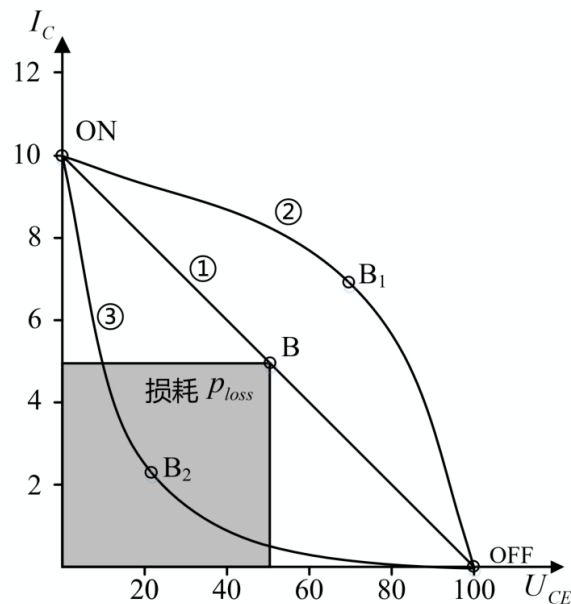
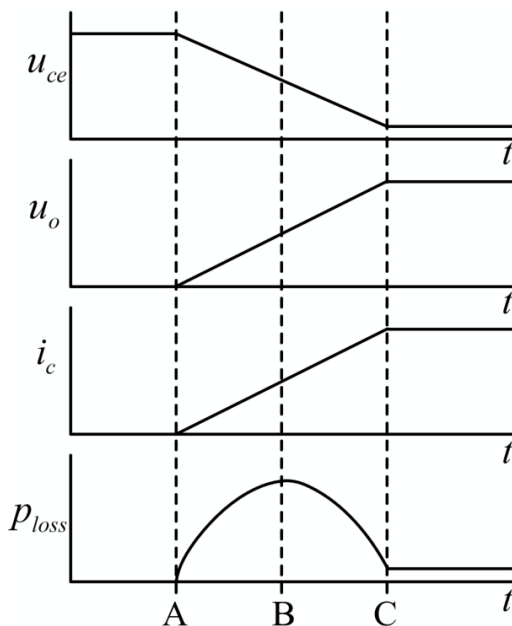
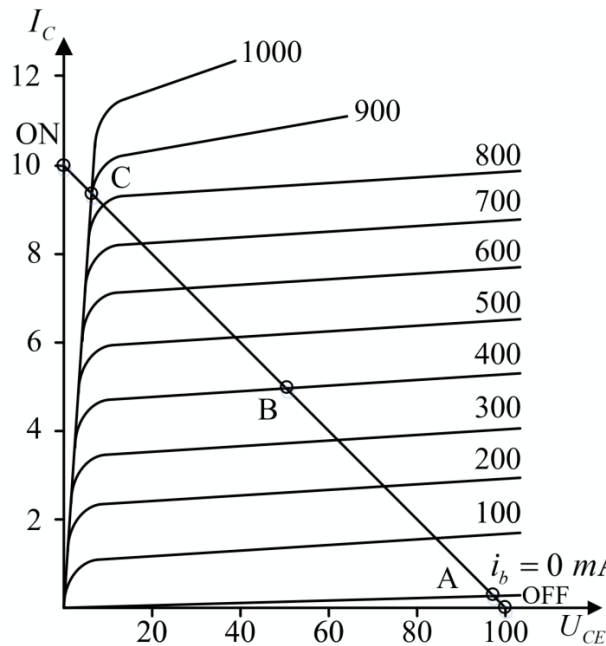
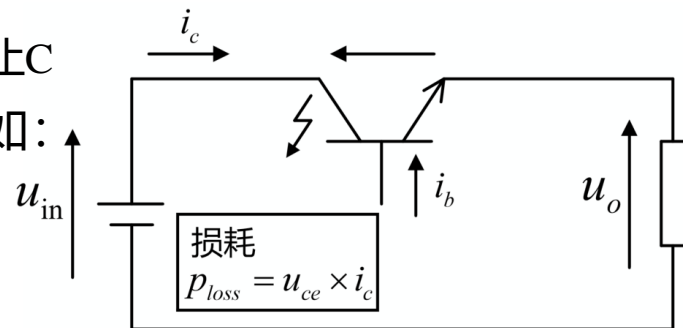
4 功率损耗 (重要)

■ 所有全控型器件均存在类似功率损耗，影响装置的效率和功率密度

➤ 开关过程路径：如左下图，饱和A → 放大B → 截止C

✓ 路径决定了功率损耗的大小（正弦状部分），如：
B₁ 路径的损耗大于B₂ 路径（由外部电路决定）

✓ 路径也决定器件是否安全：安全工作区



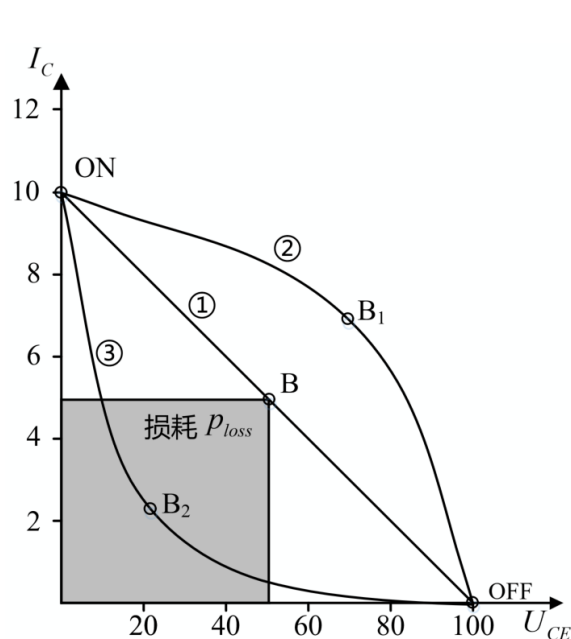


2.3.1 电力晶体管 GTR

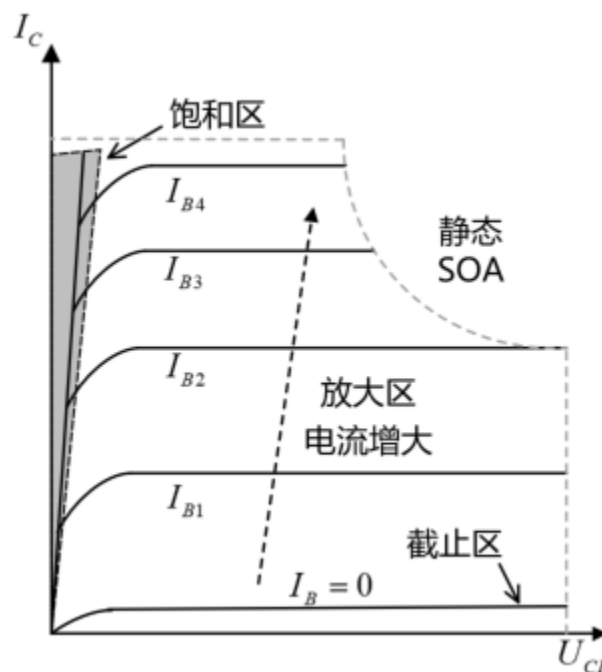
4 安全工作区 (Safe Operation Area, SOA) (重要)

■ 所有全控型器件均存在类似安全工作区，装置设计必须考虑

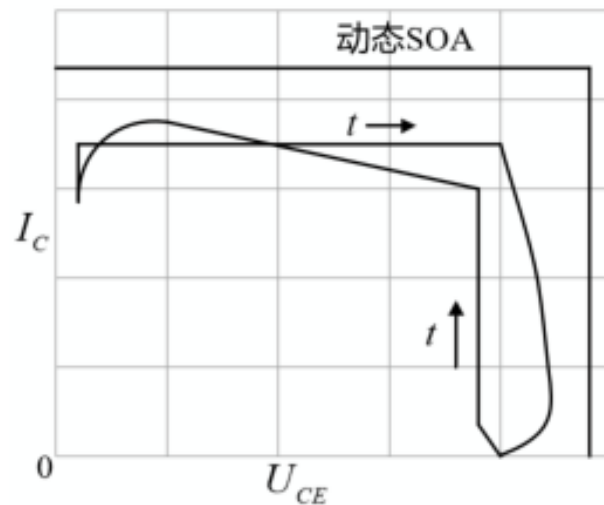
- ✓ 所有全控器件，产品使用手册上都有SOA指标（静态），而器件的开关过程是动态的，其路径不得超过产品手册上的SOA指标



(a) 三种状态及损耗



(b) 静态SOA



(c) 动态SOA (过程)



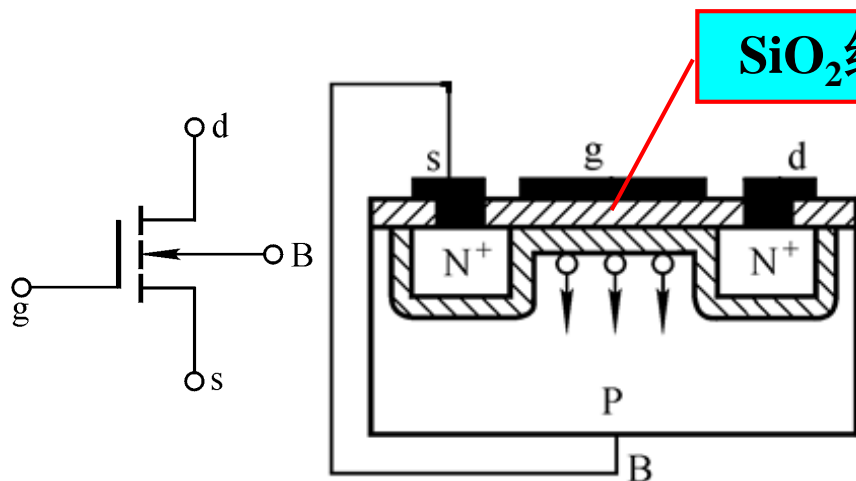
2.3.2 电力场效应晶体管 (Power MOSFET)

1 结构

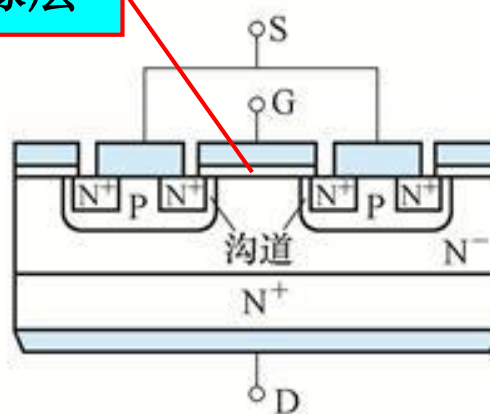
- 也称功率场效应晶体管，分**结型**、**绝缘栅型**，通常指增强绝缘栅型
- 垂直导电结构，也称VMOS (Vertical)，提高耐压/流能力
- **电压驱动型**、**单极型**：栅极电压控制漏极电流
 - ✓ 驱动电路简单，驱动功率小 (**输入电阻大**)
 - ✓ 开关速度快，工作频率高



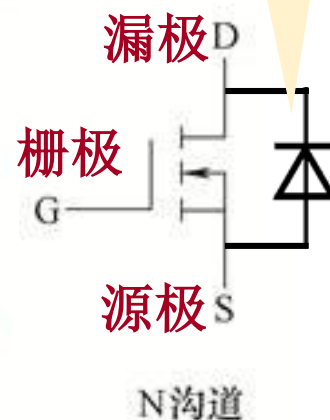
寄生
二极管



(a) 横向结构 MOS



(b) 垂直结构 VMOS



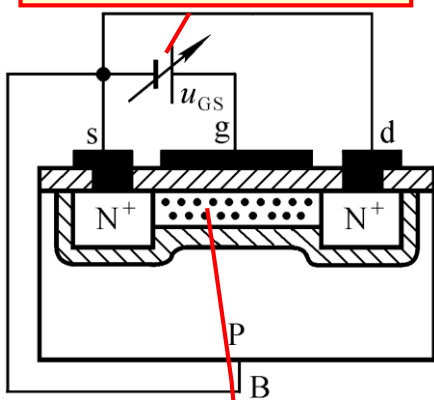


2.3.2 电力场效应晶体管 (Power MOSFET)

2 工作原理

■ u_{GS} 对导电沟道的影响

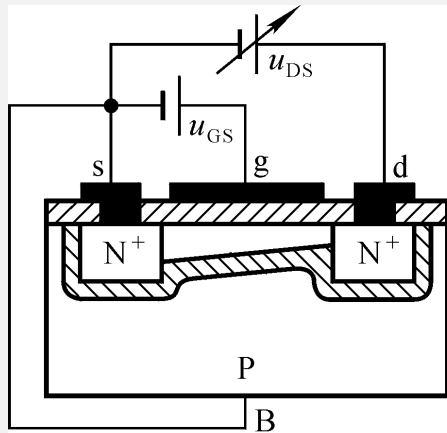
大于开启/阈值
电压 U_T (2~4V)



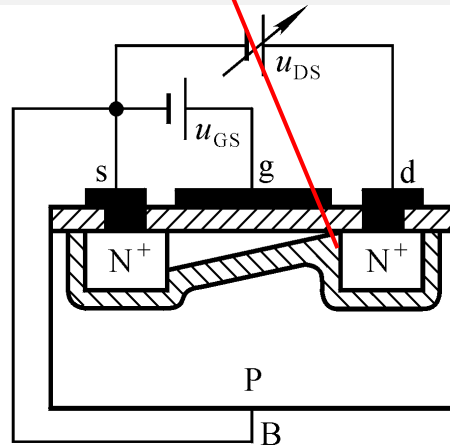
导电沟道
，反型层

■ u_{DS} 对 i_D 的影响

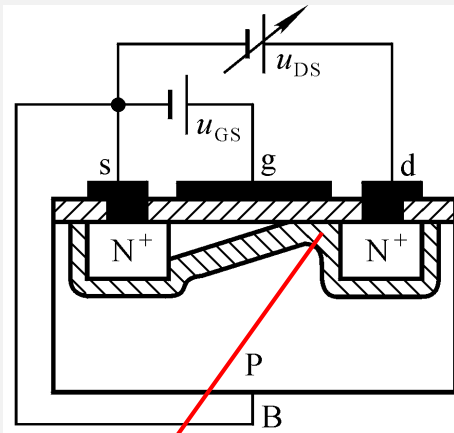
刚出现夹断



i_D 随 u_{DS} 增大而增大，可变电阻区



$u_{GD} = U_T$, 预夹断



$u_{GD} < U_T$, i_D 几乎
仅仅受控于 u_{GS} ,
恒流区(饱和区)

u_{GS} 的增大几乎全部用
来克服夹断区的电阻

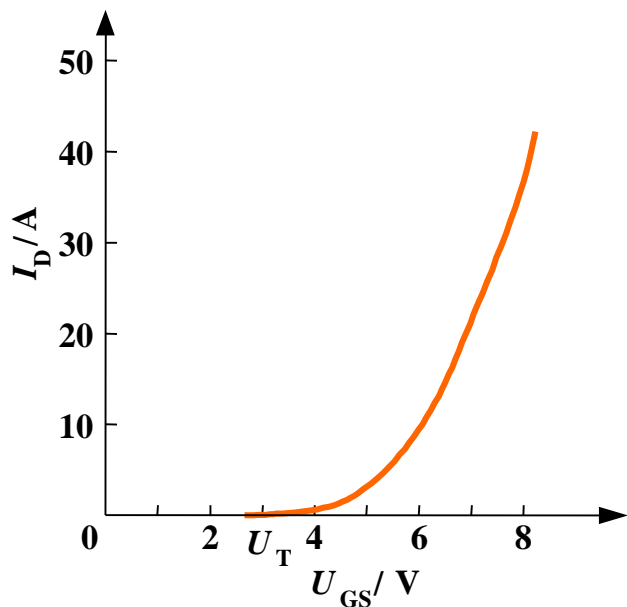


2.3.2 电力场效应晶体管 (Power MOSFET)

3 静态特性

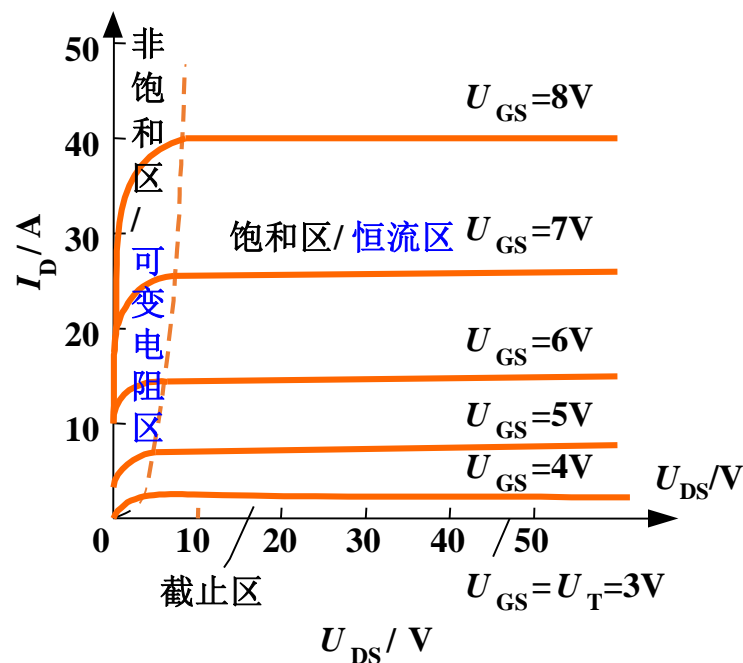
■ 转移特性

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{U_{DS}=\text{常量}}$$



■ 输出特性

$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{U_{GS}=\text{常量}}$$



- ✓ I_D 与 U_{GS} 的受控关系, 定义为跨导 G_{fs} , $G_{fs} = \left. \frac{dI_D}{dU_{GS}} \right|_{U_{DS}=\text{const.}}$
- ✓ I_D 较大时, G_{fs} 近似为常数



2.3.2 电力场效应晶体管

4 动态特性

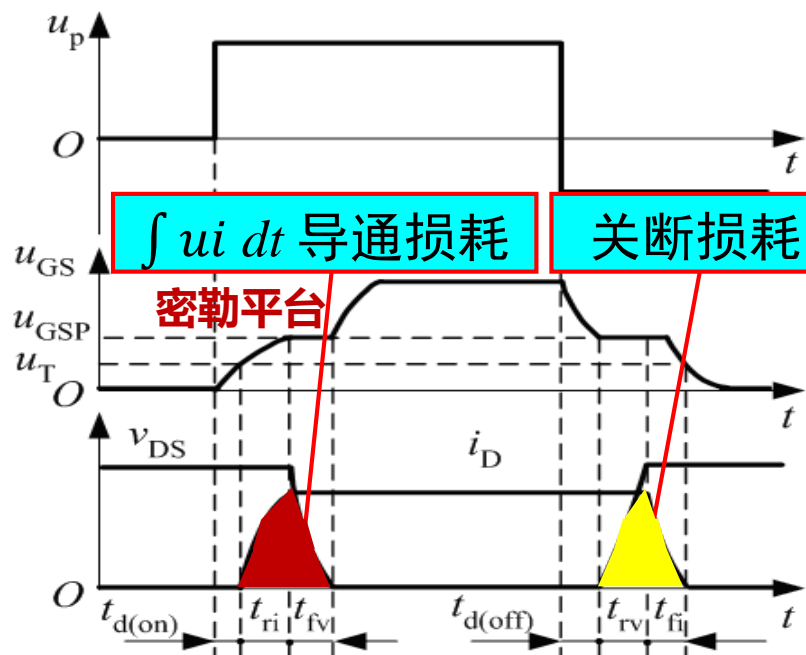
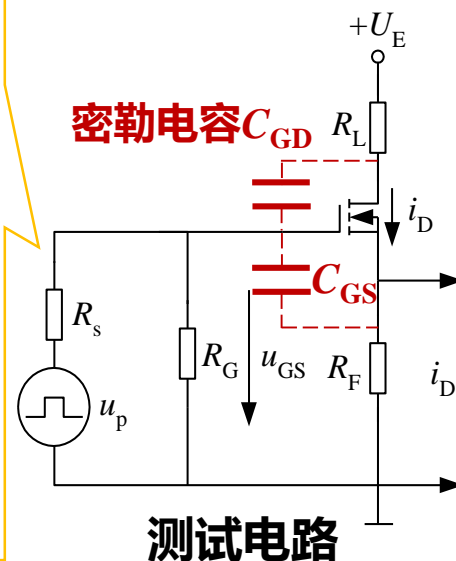
■ **开通过程**：开通时间 $t_{on} = t_{d(on)} + t_{ri} + t_{fv}$

- ✓ 对电容 C_{GS} 充电, u_{GS} 上升到 u_T
- ✓ i_D 上升, C_{GS} 充电, u_{GS} 上升到 u_{GSP}
- ✓ u_{GS} 不变, i_D 不变, C_{GD} 放电, u_{DS} 下降
- ✓ u_{GS} 继续增加到稳态值, i_D 不变
- ✓ 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}

■ **关断过程**：关断时间 $t_{off} = t_{d(off)} + t_{rv} + t_{fi}$

- ✓ u_{GS} 下降到 u_{GSP} , i_D 不变
- ✓ u_{GS} 不变, i_D 不变, C_{GD} 充电, u_{DS} 上升
- ✓ u_{GS} 继续下降到 u_T , i_D 降为零
- ✓ u_{GS} 继续降低到零
- ✓ 关断延迟时间 $t_{d(off)}$
- ✓ 电压上升时间 t_{fv} , 电流下降时间 t_{fi}

u_p 为矩形脉冲电压信号源, R_s 为信号源内阻, R_G 为栅极电阻, R_L 为漏极负载电阻, R_F 用于检测漏极电流





2.3.2 电力场效应晶体管 (Power MOSFET)

5 应用特点

- **开关速度**：受限于开通/关断时间
 - ✓ 关断过程迅速，开关时间**10~100ns**，工作频率可达**100kHz**以上，电力电子器件中**最高**
 - ✓ 降低栅极电阻 R_s ，可减小回路充放电时间常数，加快开关速度
- **驱动**：对开关信号放大后用于控制器件导通和关断（弱电控制强电）
 - ✓ **电压驱动型**，栅极电流小，驱动功率远低于GTR
 - ✓ 开关过程中需对输入电容充放电，仍需一定的驱动功率
 - ✓ 开关频率越高，所需驱动功率越大
- **特点**：电流大、耐压低，多用于功率 $<10\text{kW}$ 的装置

Note：大电流和高耐压是一对矛盾！（课本有错误）

- ✓ 耐压提高，需增加N-层，但会导致 R_{SD} 增大，通流能力降低

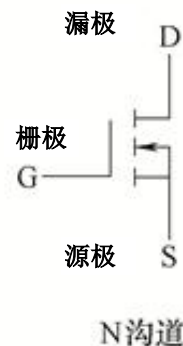


2.3.2 电力场效应晶体管 (Power MOSFET)

6 主要参数

了解

- 跨导 G_{fs} 、开启电压 U_T 、 t_{on} 、 t_{off} 等
- 漏极电压 U_{DS} 、漏极**直流**电流 I_D 和漏极**脉冲**电流幅值 I_{DM}
- 栅源电压 U_{GS} ：一般 $|U_{GS}| < 20V$ ，否则绝缘层（很薄）易击穿
- 极间电容： C_{GS} 、 C_{GD} 、 C_{DS}
- 安全工作区SOA



Note :

- ✓ 电流定额：**流经的最大电流**，非有效值或平均值，且与温度强相关，与设计余量有关（详见用户手册）
- ✓ 右上区域持续时间越长，SOA越小

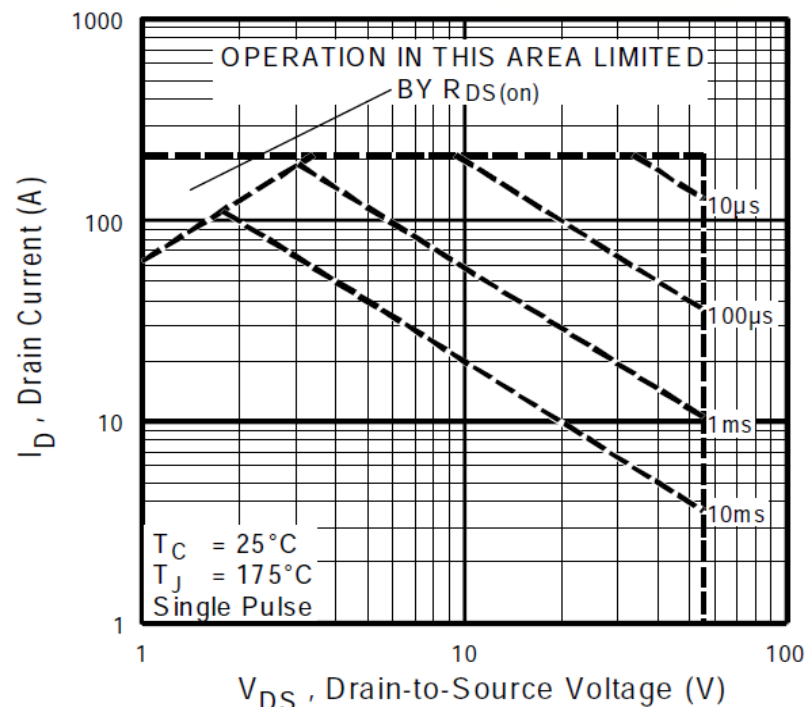


图. IRFP048N (60V,60A) SOA

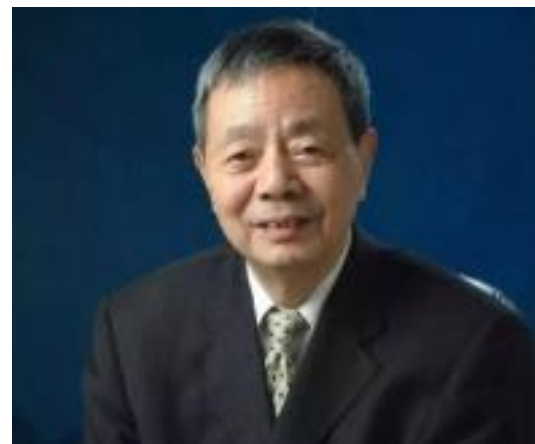


2.3.2 电力场效应晶体管 (Power MOSFET)

7 我国在电力MOSFET领域的贡献

陈星弼 (1931.1.28 ~ 2019.12.4)

- 半导体器件及微电子学专家，中国科学院院士，电子科技大学教授、博士生导师
- 研究半导体电力电子器件的理论与结构创新，被誉为“**中国功率器件领路人**”
- 1982~1988年，在解决电力MOS管**降低导通电阻与提高耐压之间矛盾等问题**上作出系列重要贡献：发明三种新结构耐压层，提高了功率器件的综合性能，发明的器件结构被称为Cool-MOS结构，目前仍是主流结构。专利被西门子等公司购买，成果得到全世界认可



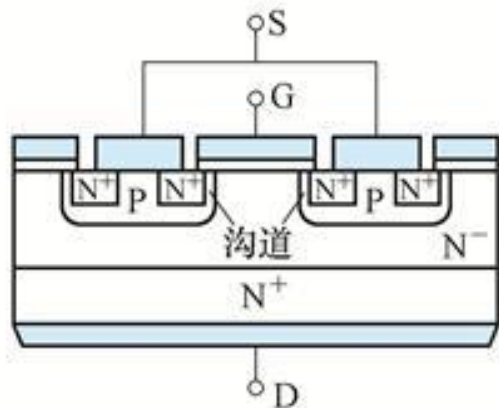
<https://baike.baidu.com/item/陈星弼/4312745?fr=Aladdin>



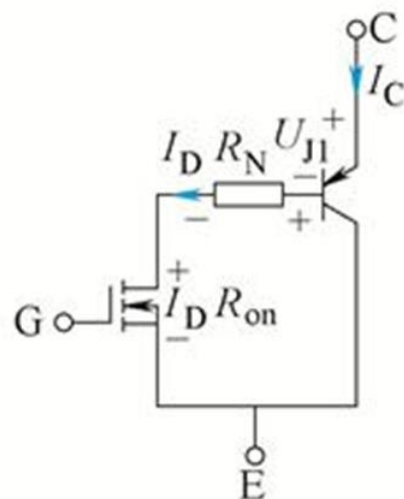
2.3.3 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)

1 结构

- 为提高耐压值，将 MOSFET 和 GTR 复合（达林顿结构）得到 IGBT
- VMOSFET基础上增加高掺杂P区，构成三端器件：栅极G、**集电极C**、**发射极E**
- 有N沟道、P沟道



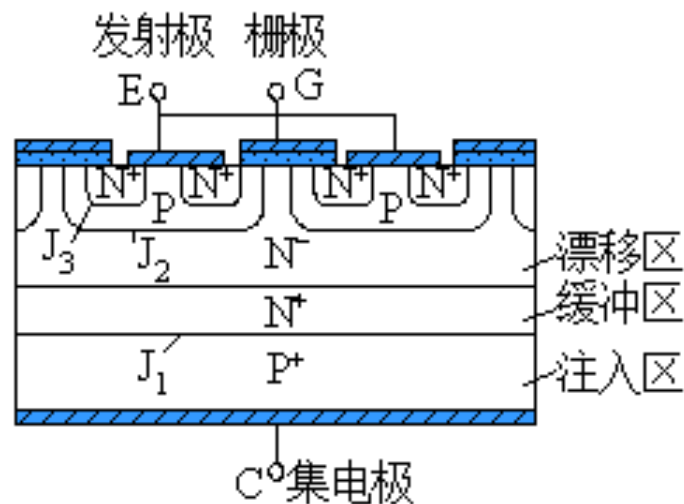
VMOS结构



IGBT等效电路



IGBT符号



IGBT结构



2.3.3 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)

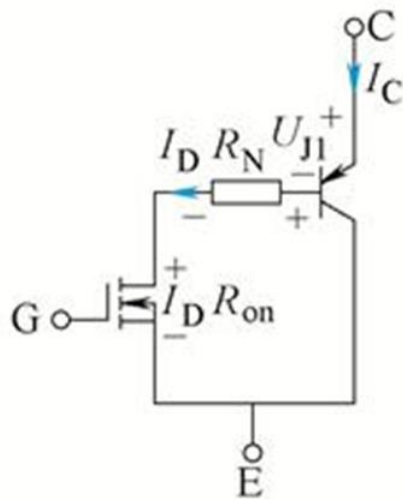
2 工作原理

■ 与电力MOSFET基本相同，电压驱动型（场控）

✓ $U_{GE} > \text{开启电压 } U_{GE(th)}$ ，MOSFET内形成导电沟道，为GTR提供基极电流，IGBT导通

✓ $U_{GE} \leq 0$ ，MOSFET内导电沟道消失，GTR基极电流被切断，IGBT关断

■ 复合型器件，开关速度低于电力MOSFET



IGBT等效电路



IGBT符号



2.3.3 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)

3 静态特性

■ 转移特性:

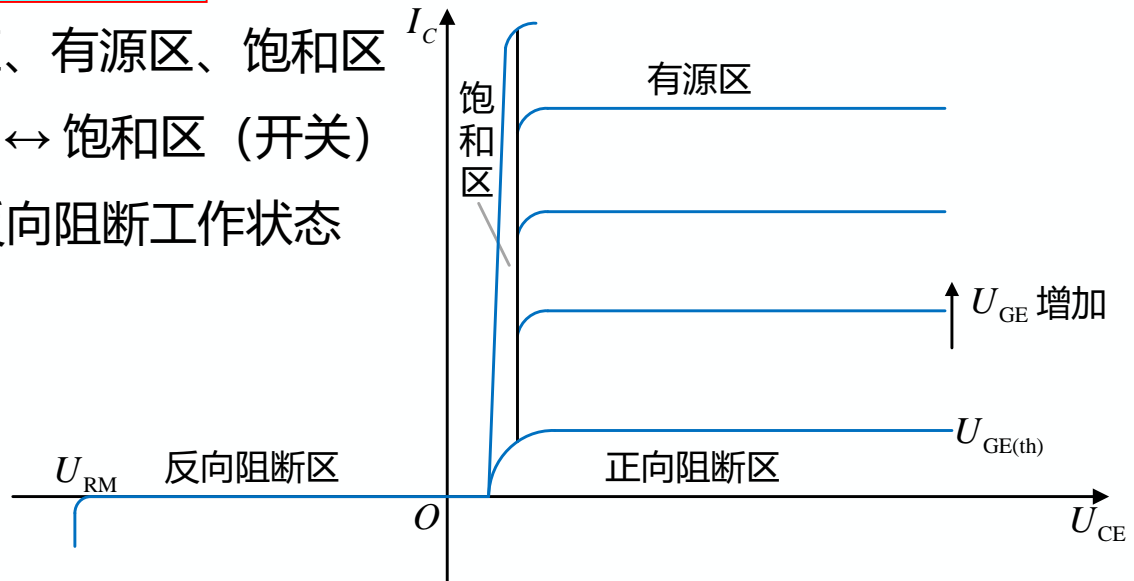
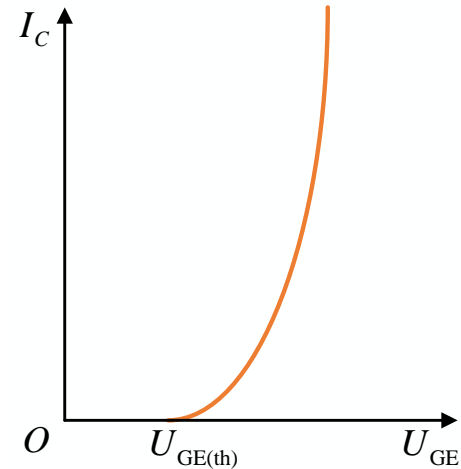
$$i_c = f(u_{GE}) \Big|_{U_{CE}=\text{常量}}$$

- ✓ 开启电压 $U_{GE(th)}$ 随温度升高而下降

■ 输出特性:

$$i_c = f(u_{CE}) \Big|_{U_{GE}=\text{常量}}$$

- ✓ 三个区：正向阻断区、有源区、饱和区
- ✓ 工作区：正向阻断区 ↔ 饱和区（开关）
- ✓ $U_{CE} < 0$ 时，IGBT为反向阻断工作状态





2.3.3 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)

4 动态特性

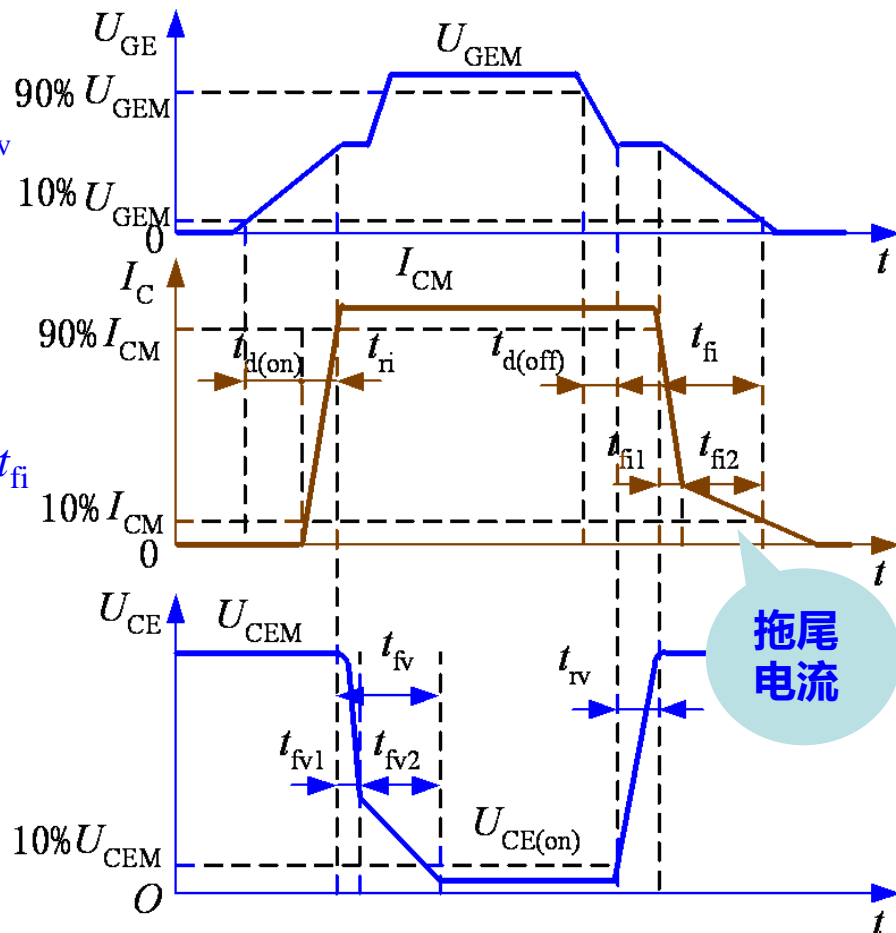
■ 开通过程：开通时间 $t_{on} = t_{d(on)} + t_{ri} + t_{fv}$

- ✓ 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} : 分为 t_{fv1} 和 t_{fv2}

■ 关断过程：关断时间 $t_{off} = t_{d(off)} + t_{rv} + t_{fi}$

- ✓ 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}

Note: 上升/下降时间与外电路参数强相关，如可选栅极电阻以控制

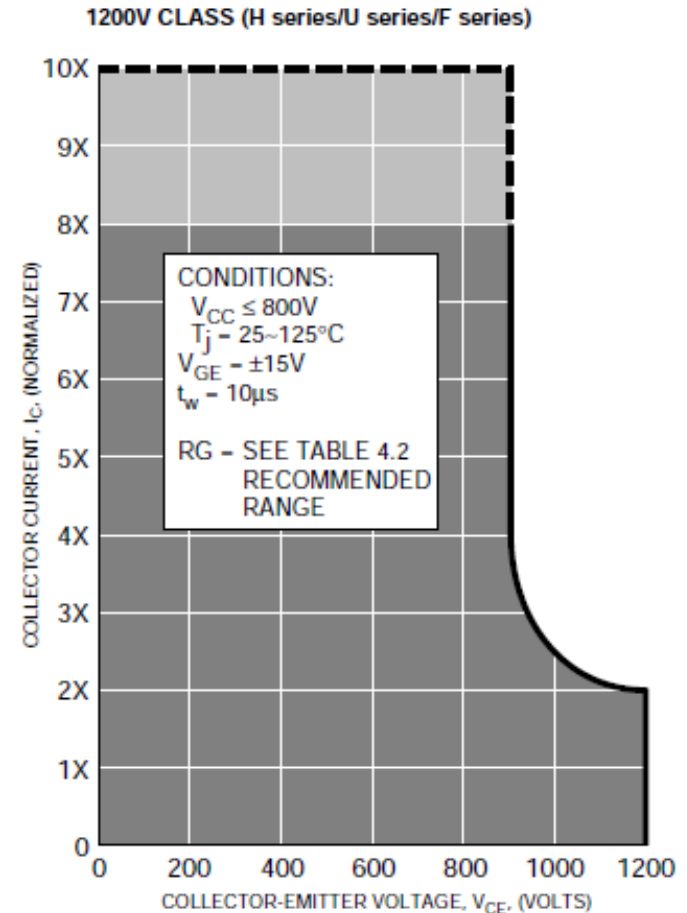




2.3.3 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)

5 主要参数及特点

- 集电极电流 I_C 、栅射电压 U_{GE} 、开通时间、关断时间等
- 最大**集射极间电压** U_{CES} ：由器件内PNP晶体管所能承受的**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
- SOA：与温度和电流持续时间有关
- **特点**：兼具MOSFET和GTR特点，即电压驱动，耐压高/电流大，开关频率低于MOSFET但高于GTR

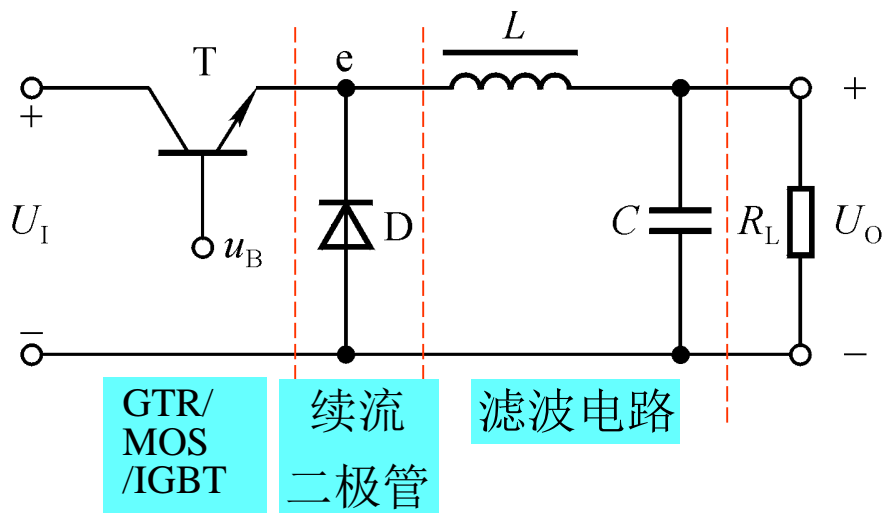


三菱产品1200V-IGBT SOA

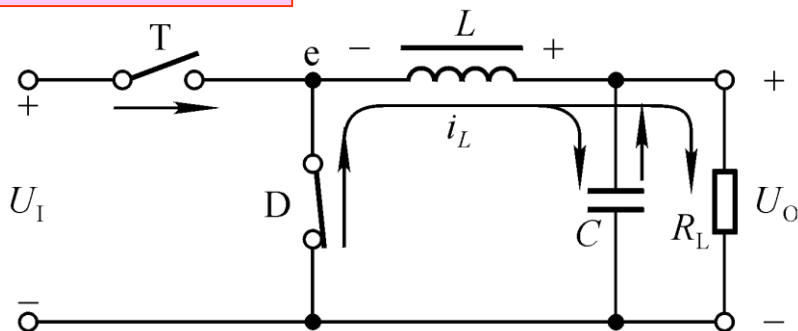


2.3.4 典型应用：Buck DC-DC变换电路

■ 电路组成及工作原理

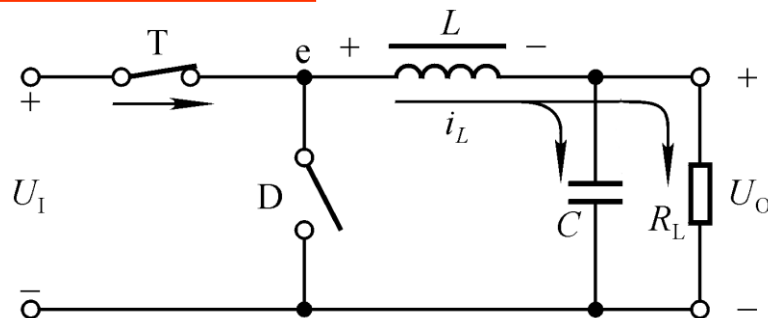


$u_B = U_L$ 时



T 、 D 均工作在开关状态，
分析时视为理想开关

$u_B = U_H$ 时



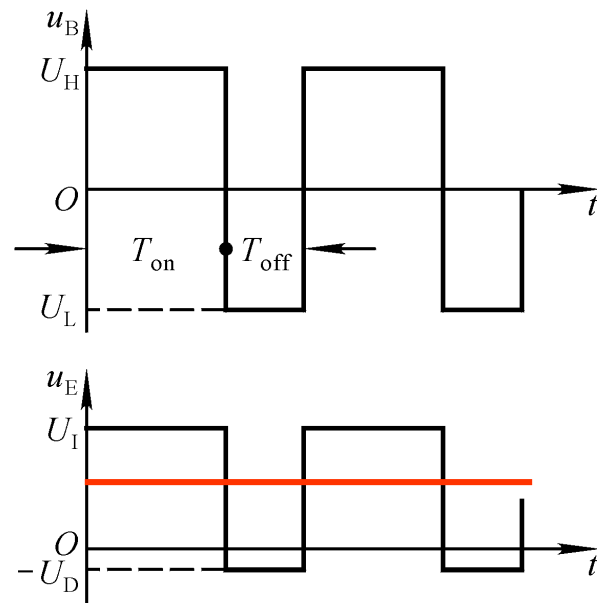
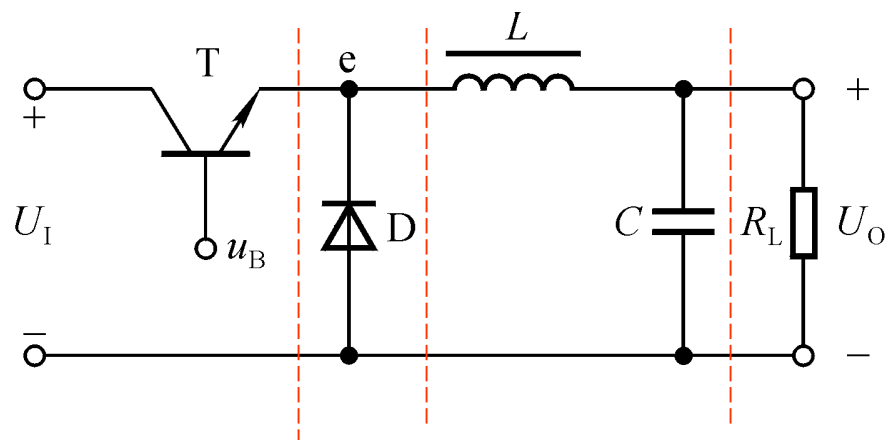
T 饱和导通， D 截止，
 $u_E \approx U_I$ ； L 储能， C 充电

T 截止， D 导通， $u_E \approx -U_D$ ； L 释放能量， C 放电



2.3.4 典型应用：Buck DC-DC变换电路

■ 波形分析及输出电压平均值



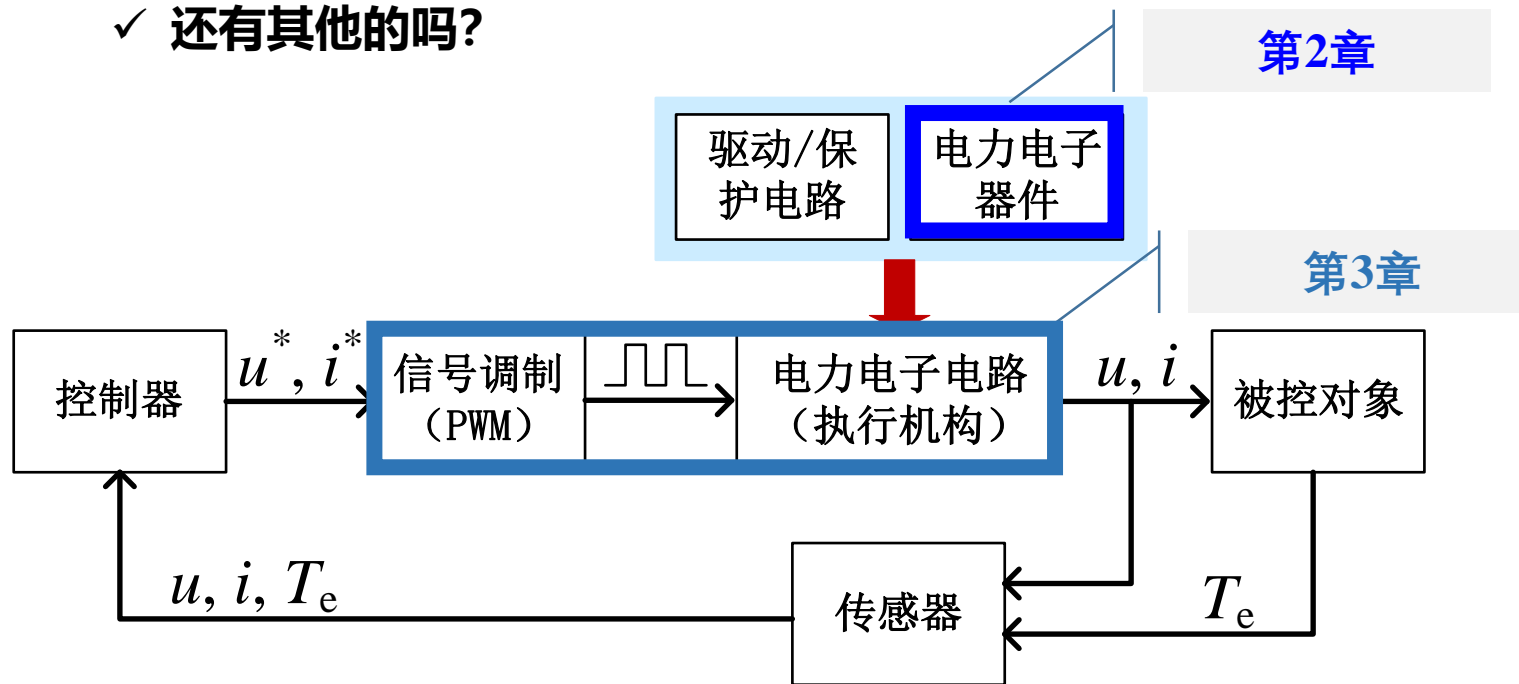
$$U_O \approx \frac{T_{\text{on}}}{T} \cdot U_I + \frac{T_{\text{off}}}{T} \cdot (-U_D) \approx \delta U_I$$



2.4 本章小结

■ 器件→电路

- ✓ 灵活利用非线性器件+线性元件，实现输入-输出的某种“运算”
- ✓ “基本运算”：AC-DC (整流)，DC-DC (斩波)，DC-AC (逆变)，AC-AC
- ✓ 还有其他的吗？



电力电子装置的组成