

电气精品教材丛书

“十三五”江苏省高等学校重点教材

工业和信息化部“十四五”规划教材

电力电子技术 · Power Electronics

第3章 高频功率半导体器件

2023/11/10



3.1 功率半导体器件分类

★ 3.2 功率二极管

3.3 双极型功率晶体管

★ 3.4 功率场效应晶体管

3.5 绝缘栅双极型晶体管



功率半导体器件分类

功率半导体器件分类			
按可控性分类	不可控： 功率二极管	半控型： 晶闸管及其派生	全控型： BJT、MOSFET、IGBT
按驱动信号分类	电压驱动型： MOSFET、IGBT		电流驱动型： BJT
按载流子导电情况	单极型： MOSFET		双极型： 晶闸管、BJT、IGBT



3.2 功率二极管

3.2.1 基本结构与工作原理

3.2.2 二极管的稳态特性

3.2.3 二极管的动态特性

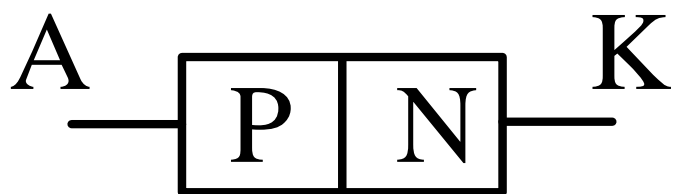
3.2.4 二极管类型

3.2.5 二极管的主要参数

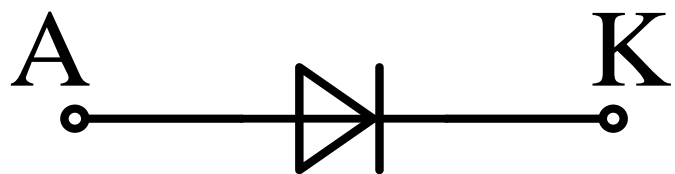


基本结构与工作原理

- 功率二极管由一个面积较大的PN结和两端引线以及封装组成。
- 常用于整流、续流和电压箝位等。



基本结构



电气符号



基本结构与工作原理

■ 两种半导体

- P型（空穴型）
- N型（电子型）

■ 一个区

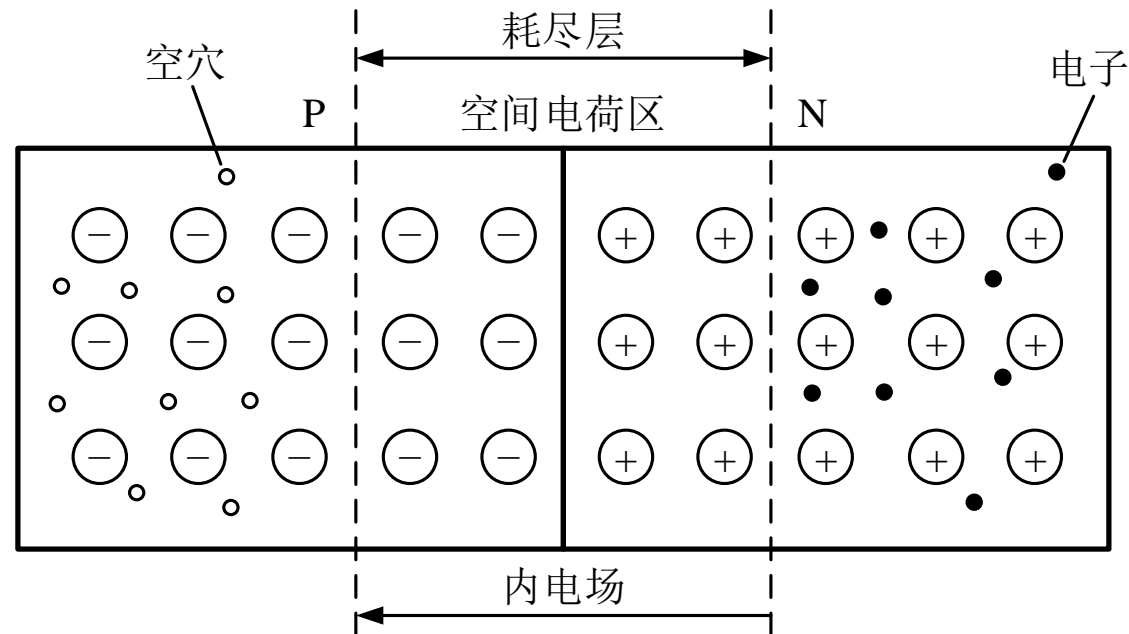
- 由不能移动的带电离子组成空间电荷区

■ 两种运动

- 由于浓度差引起多子的扩散运动。
- 在内电场作用下少子产生漂移运动。

■ 一个PN结

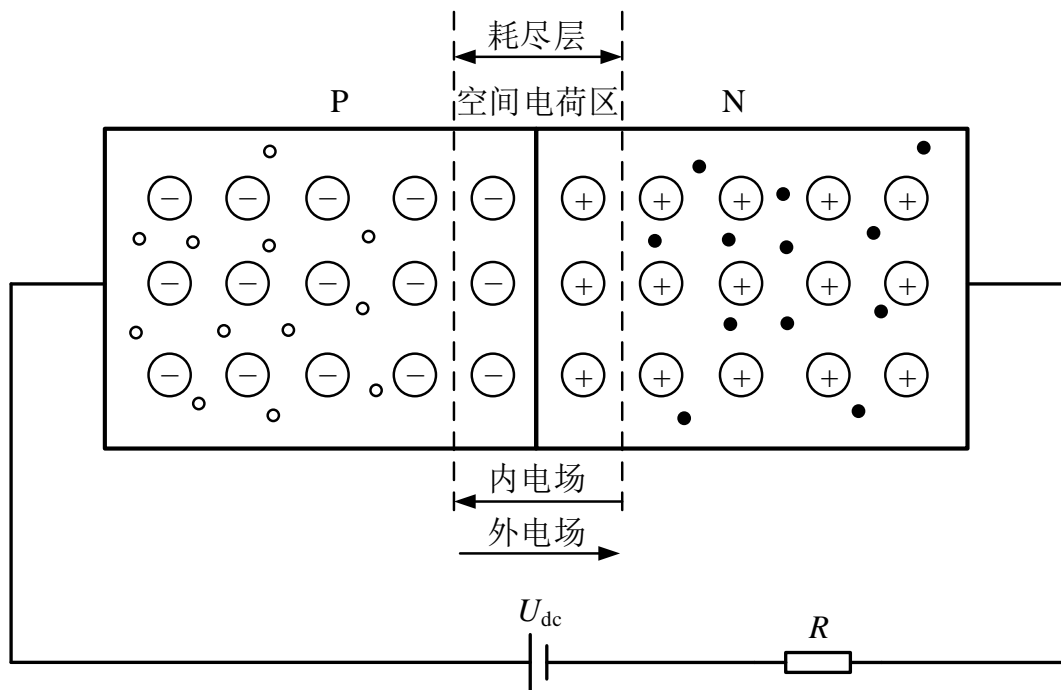
- 扩散运动和漂移运动的动态平衡



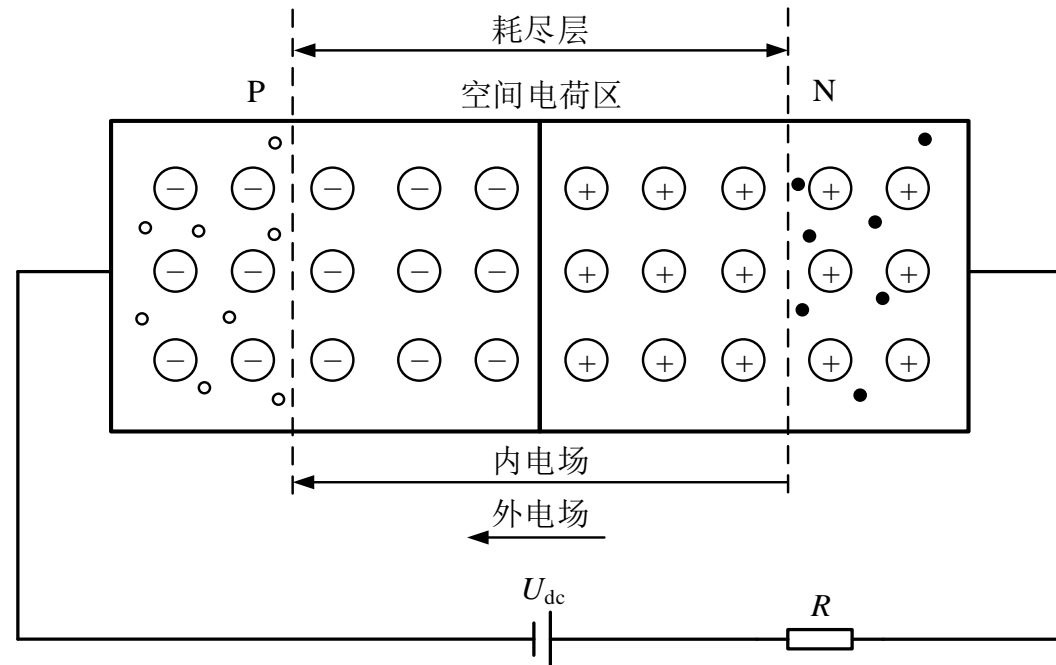
PN结示意图

基本结构与工作原理

PN 结的单向导电性



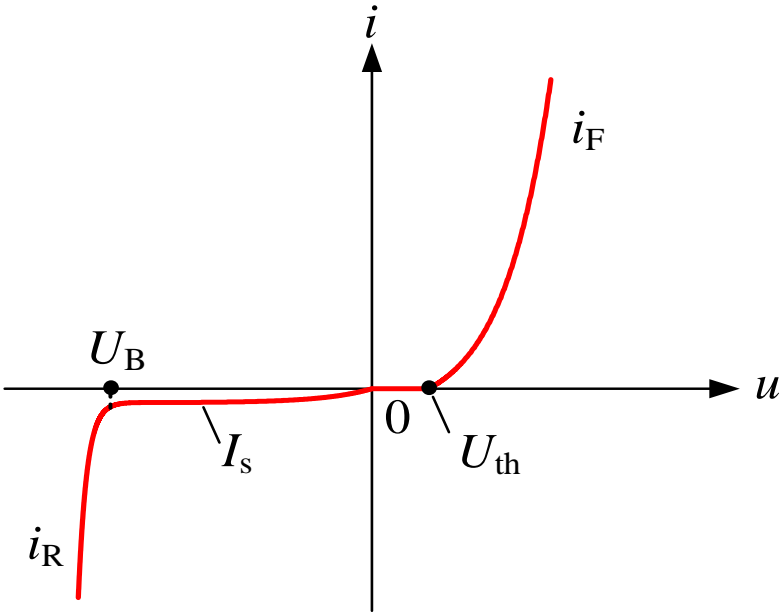
- 内电场被削弱，耗尽层变窄。
- 扩散占优势。
- PN 结呈现的电阻很小，称为正向导通。



- 内电场被加强，耗尽层变宽。
- 漂移占优势。
- PN 结呈现的电阻很大，称为反向截止。

二极管的稳态特性

- 门坎电压 U_{th} :
 - 当外加电压大于 U_{th} 时，二极管导通，此后电流迅速上升。
- 反向饱和电流 I_s :
 - 当外加反向电压时，二极管反向截止，只有微小而恒定的反向漏电流 I_s 。
- 击穿电压 U_B :
 - 当反向电压超过 U_B 后，二极管将被击穿，反向电流迅速增加。
 - 雪崩击穿、齐纳击穿；可能导致热击穿。

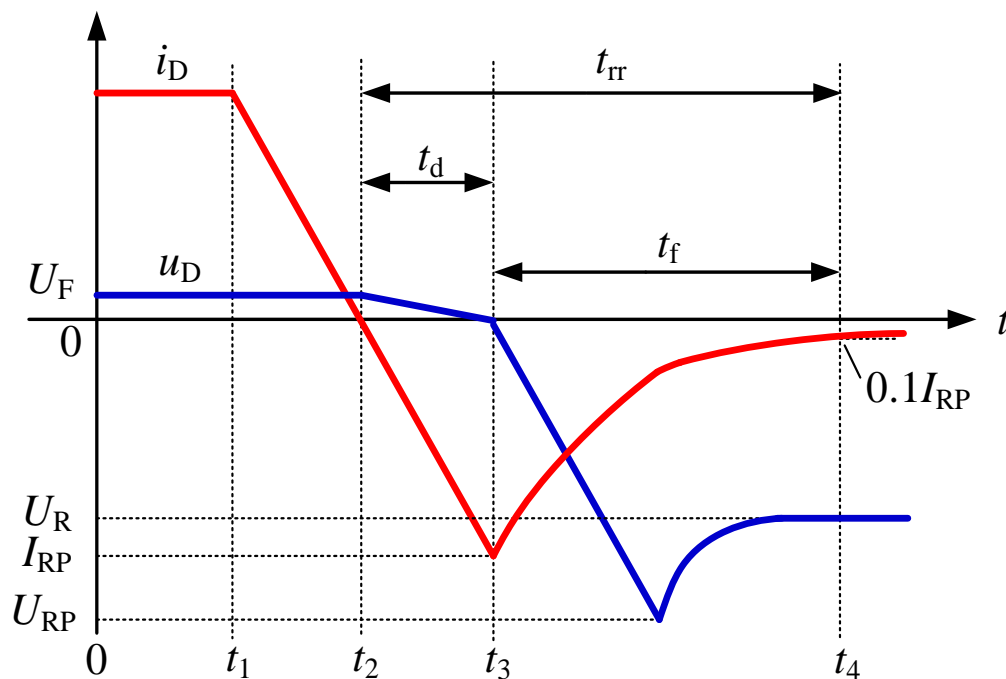


功率二极管伏安特性曲线

	正向导通	反向截止	反向击穿
电流	正向大	微小电流 I_s	反向大
电压	1V左右	反向大	反向大
阻态	低阻态	高阻态	——

II 二极管的动态特性—反向恢复

定义：当处于正向导通的二极管突然施加反压时，它不能立即关断，而是需经过一段时间才能恢复反向阻断能力并进入完全关断状态，这个过程称为反向恢复。

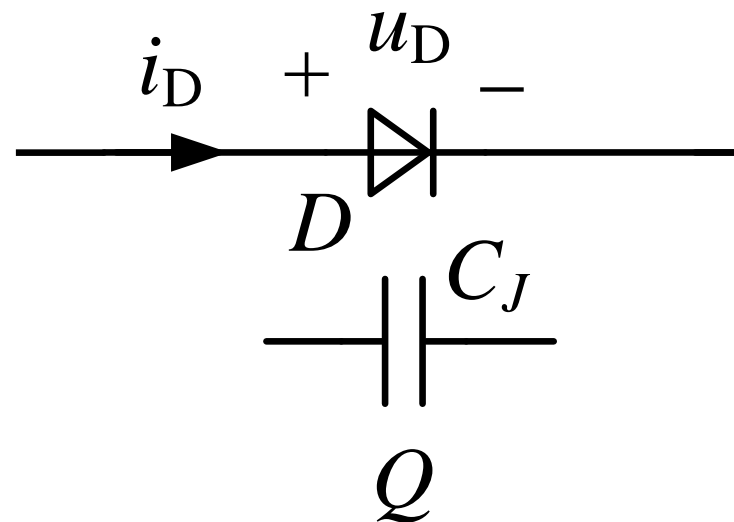


功率二极管的反向恢复过程

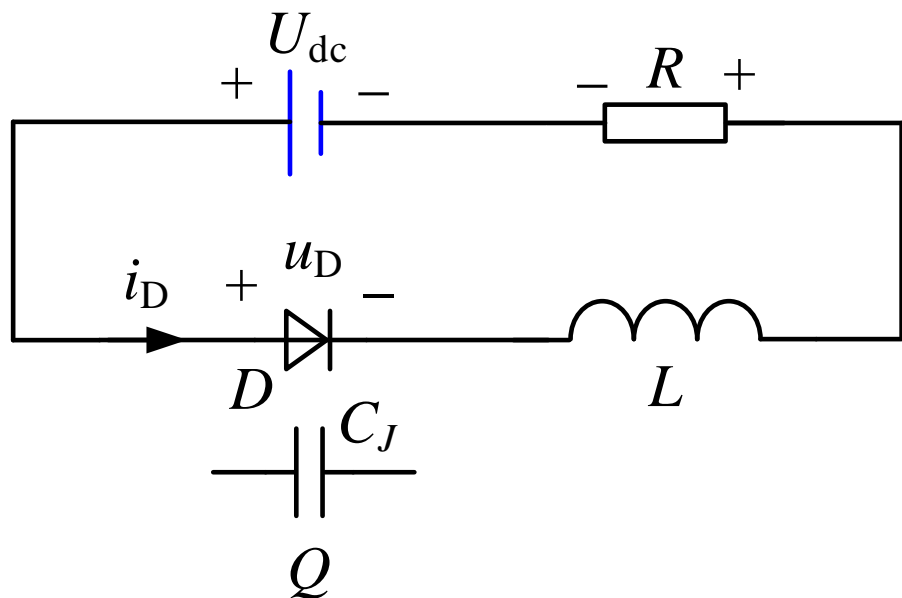
原理：结电容效应

C_J ：二极管的结电容（势垒电容+扩散电容）

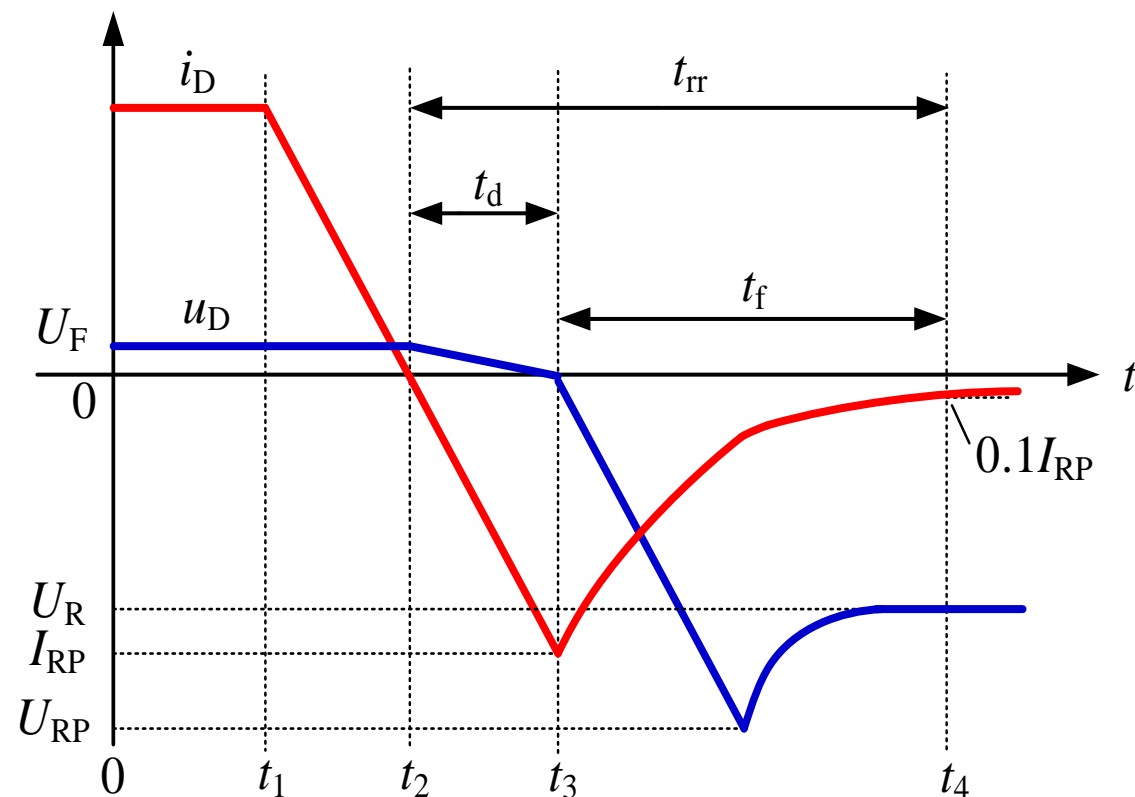
Q ：结电容存储电荷



考虑结电容的二极管模型

$[0, t_1]$ 

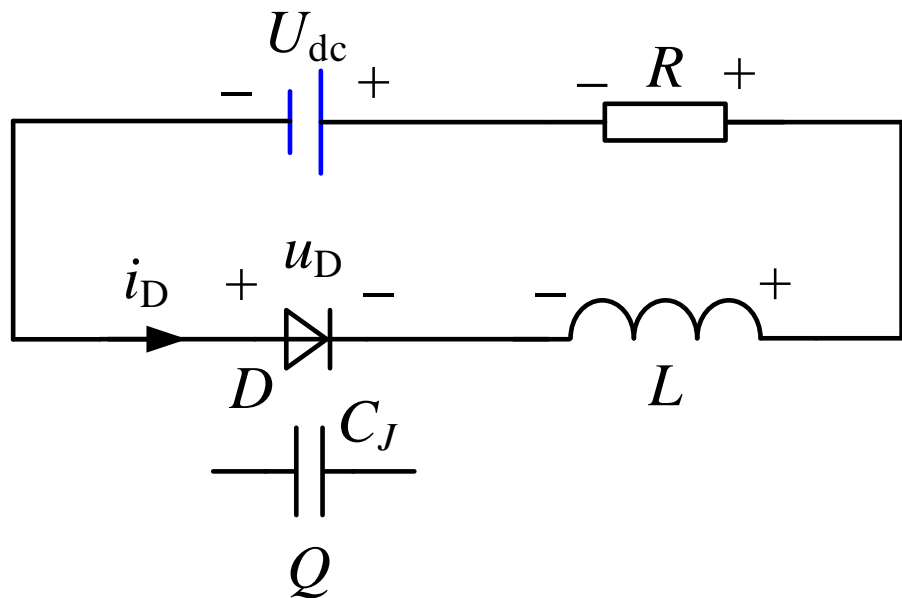
- 在 t_1 时刻之前, 二极管正向导通, $u_D = U_F$ 。
- 在 t_1 时刻, U_{dc} 突然反向, i_D 开始下降。由于回路中的电感 L , i_D 不会瞬时下降到零, 二极管仍处于导通状态。



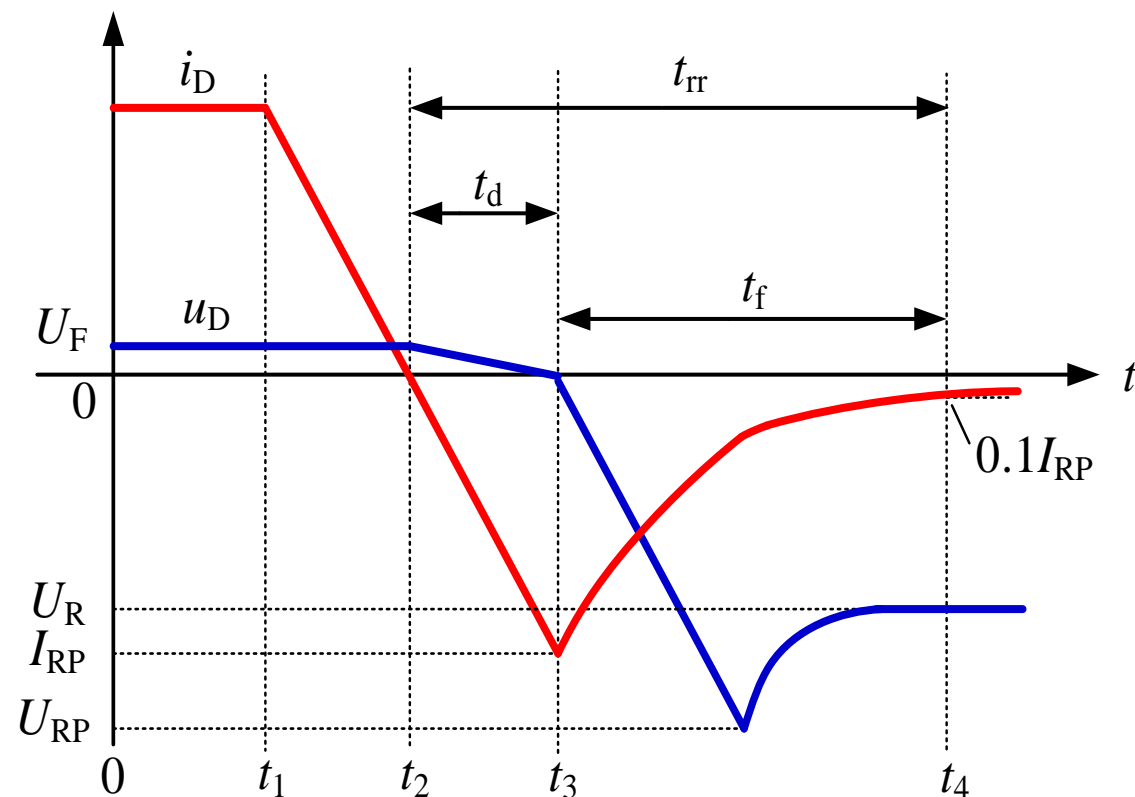
功率二极管的反向恢复过程

结电容分析反向恢复

$[t_1, t_2]$



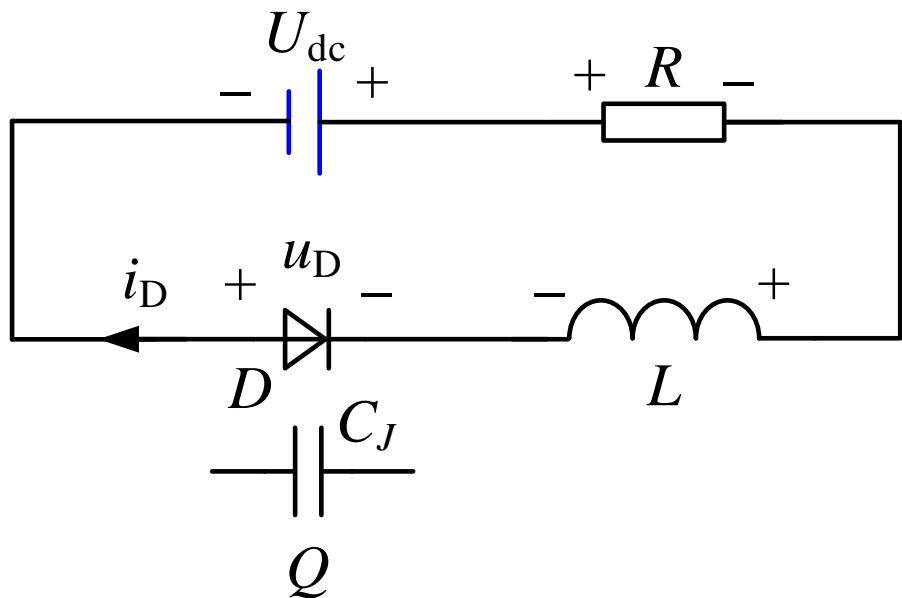
- 在 t_2 时刻, i_D 下降至零。由于结电容存储的电荷 Q 并不能立即消失, u_D 仍为正向导通压降 U_F 。



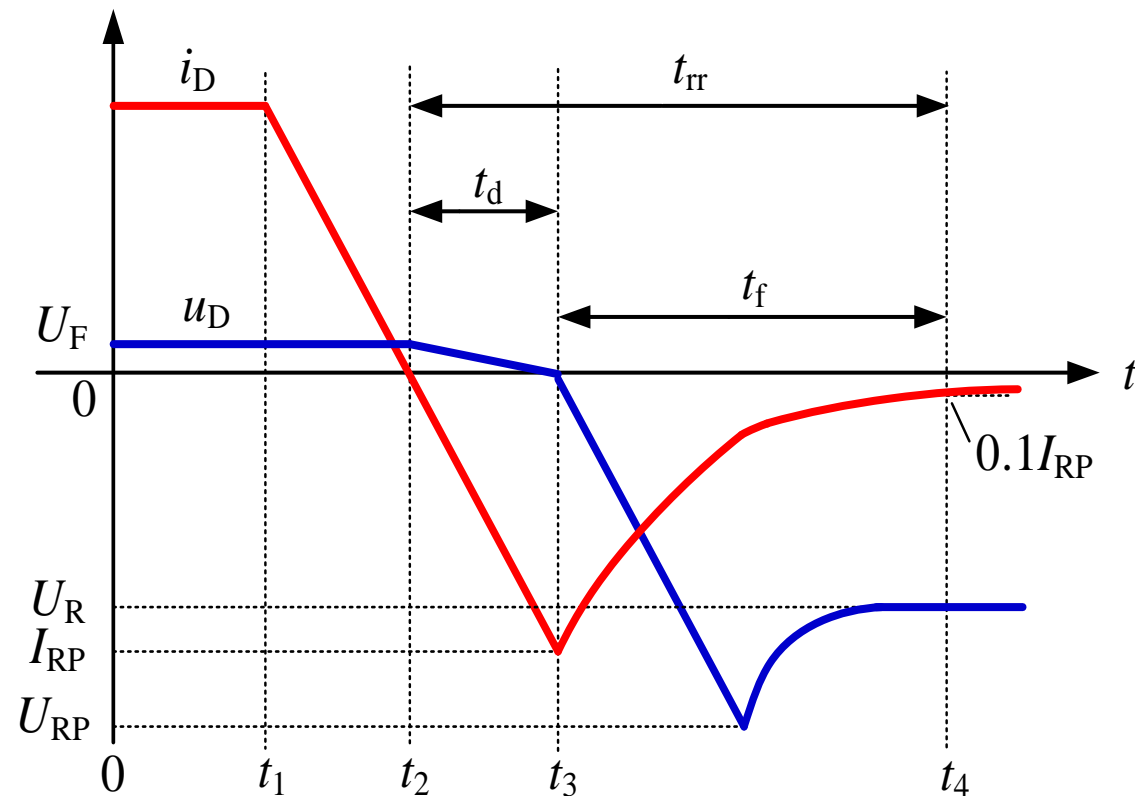
功率二极管的反向恢复过程

结电容分析反向恢复

$[t_2, t_3]$



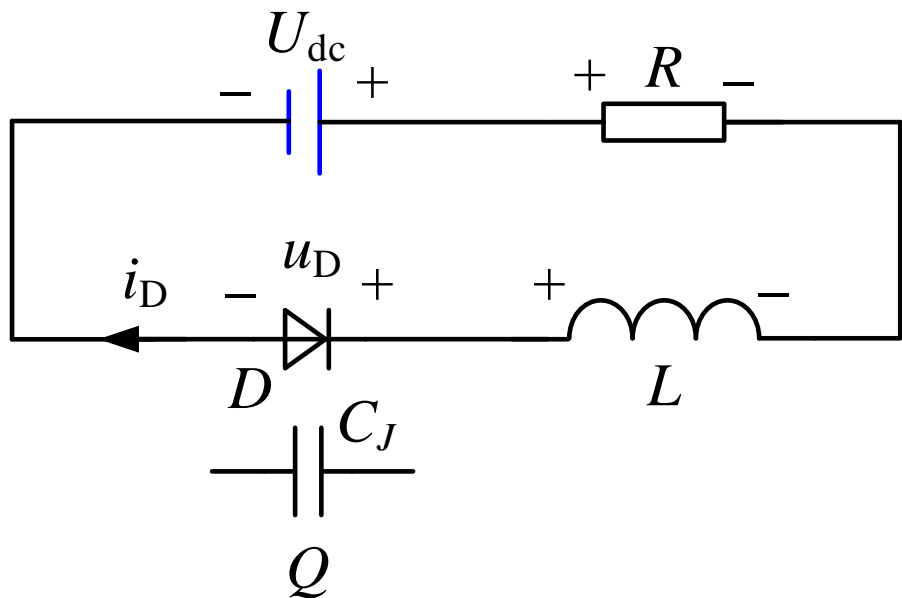
- 在 t_3 时刻，反向电流达到最大值 I_{RP} ，该反向电流使存储电荷逐渐消失， u_D 下降至零。



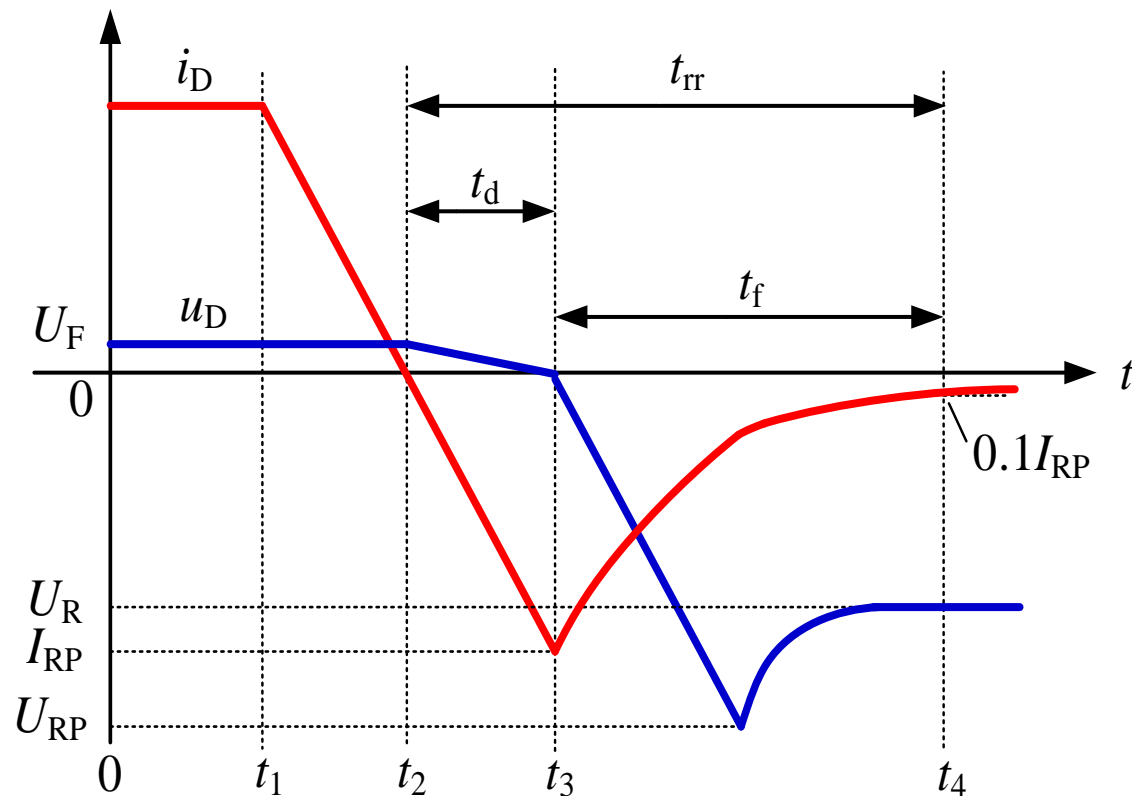
功率二极管的反向恢复过程

结电容分析反向恢复

$[t_3, t_4]$



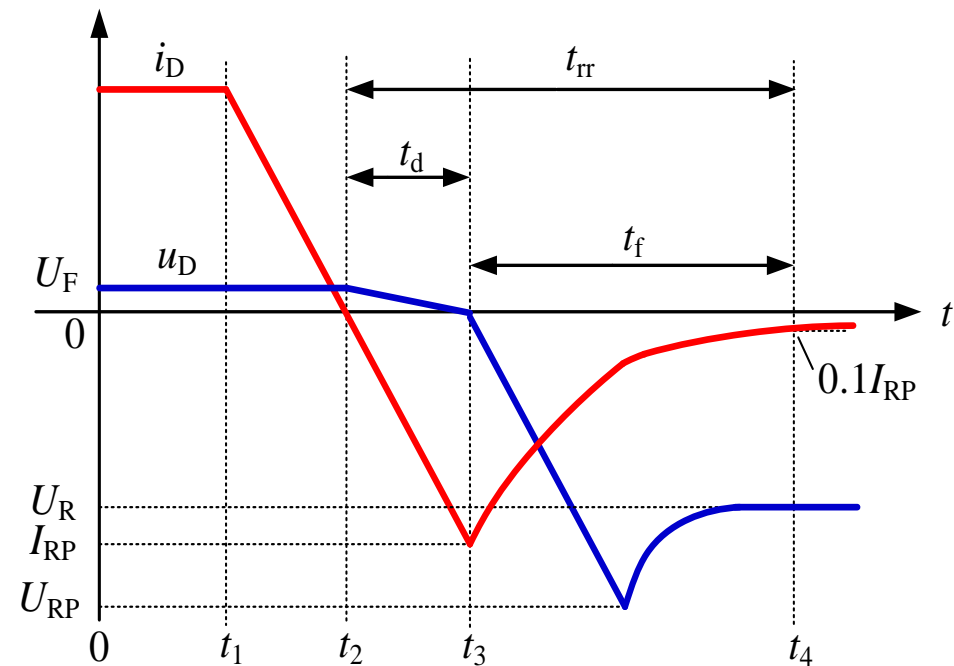
- 二极管反向阻断能力逐渐恢复，反向等效电阻迅速增大， u_D 反向增大到最大值 U_{RP} 后逐渐减小至稳态值 U_R 。当反向电流降至约 $10\%I_{RP}$ 时，近似认为反向恢复过程结束。



功率二极管的反向恢复过程

二极管的动态特性

- t_{rr} : 二极管的反向恢复时间
- t_d : 延迟时间
- t_f : 下降时间
- S_F : 柔度系数 $S_F = t_f / t_d$
- 电压与电流交叠区产生较大的反向恢复损耗。
- 选择器件时，额定电压应大于电压尖峰产生的电压应力。



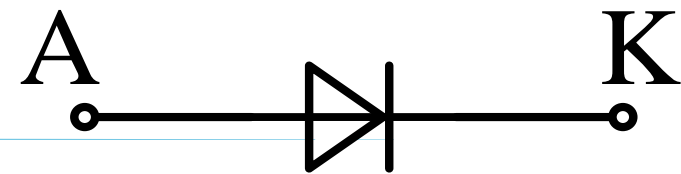
功率二极管的反向恢复过程

二极管类型

	普通二极管	快恢复二极管	硅肖特基二极管	SiC肖特基二极管	GaN肖特基二极管
额定电压	数千伏	数千伏	小于150V	600V~1700V	600V
额定电流	数百安	数百安	数百安	小于50A	小于10A
导通压降	大	较大	小	小	小
反向恢复时间	大于5 μ s	50ns~5 μ s	小于30ns	小10~20ns	小10~20ns
工作频率	1kHz以下	数十kHz以下	数百kHz以下	数兆Hz以下	数兆Hz以下
工作温度	低	低	低	高	高
其他特点	不建议并联	不建议并联	不建议并联	可并联 漏电流最小	商业化较少 (在研)
适用场合	电压/电流任意	高压/电流任意	低压大电流	高压中等电流	中压小电流



二极管的主要参数



电气符号

■ 正向导通压降 U_F

在指定温度下，二极管流过某一稳态正向电流时对应的正向导通压降。

■ 额定正向平均电流 I_F

在指定结温、规定散热条件下二极管允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。

■ 反向重复峰值电压 U_{RRM}

二极管工作时所能重复施加的反向最高峰值电压（即额定电压）。使用时，通常按电路中二极管电压应力的 1.5 倍来选取二极管额定电压。

■ 反向恢复时间 t_{rr}

从正向电流过零到反向电流下降到其峰值 10% 的时间间隔。

■ 最高允许结温 T_{jM} 结温

PN 结不损坏所能承受的最高平均温度。



3.3 双极型功率晶体管

3.3.1 基本结构与工作原理

3.3.2 BJT的稳态特性

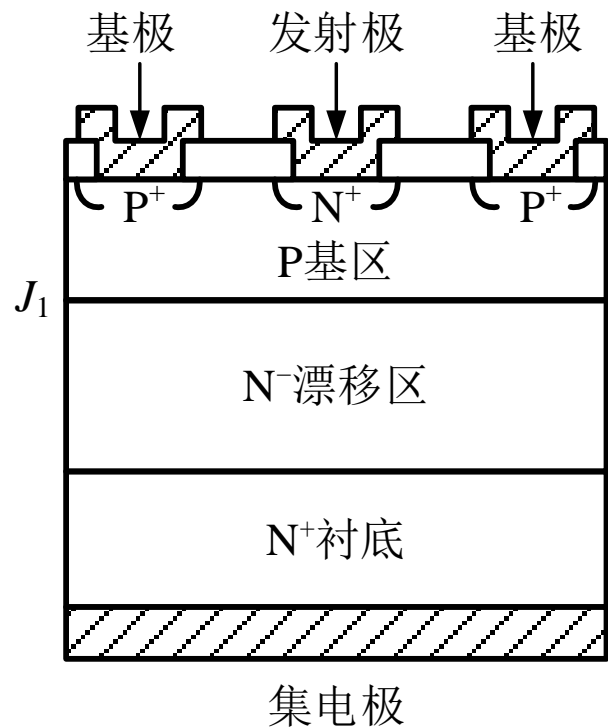
3.3.3 BJT的动态特性

3.3.4 BJT的主要参数

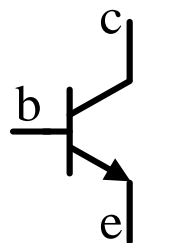


基本结构与工作原理

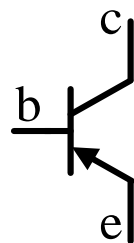
- BJT--Bipolar Junction transistor, 双极型功率晶体管。
- BJT由三层半导体、两个 PN 结构成, 分为 NPN 型和 PNP 型两类。



NPN型BJT结构图



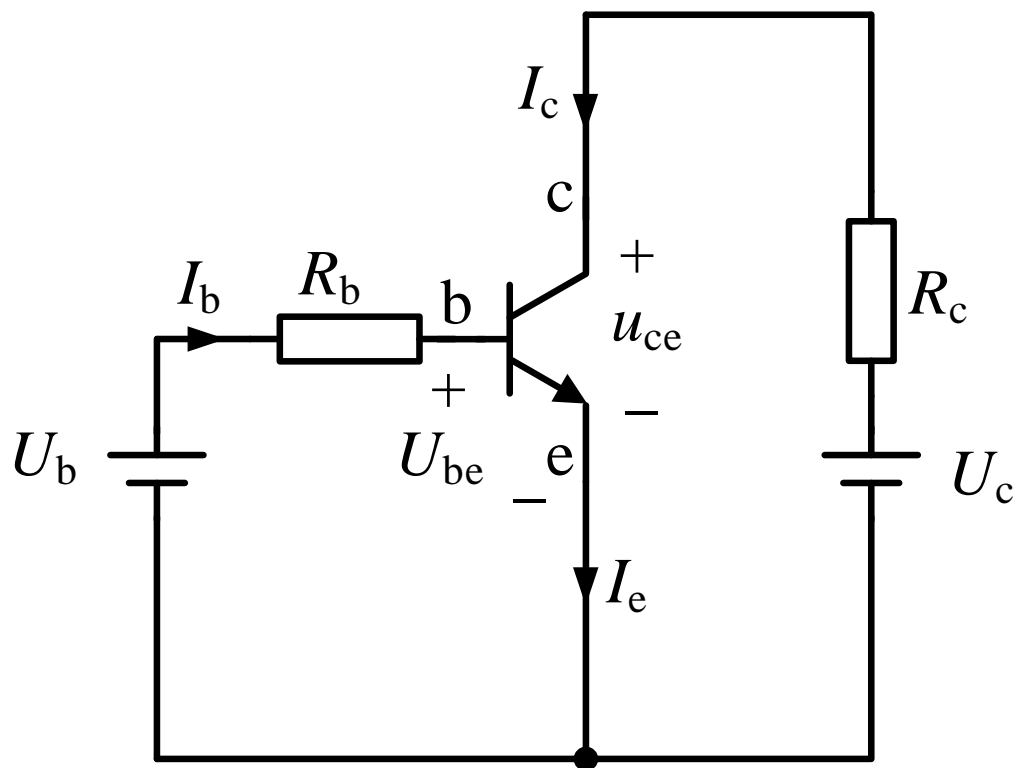
NPN型



PNP型

- N⁻漂移区的电阻率和厚度决定器件的阻断能力
- 电阻率高、厚度大，阻断能力强
- 增大了导通饱和电阻
- 降低了电流增益 ($\beta=5\sim 20$)

基本结构与工作原理



NPN型BJT共射极电路

■ 基极电流

$$I_b = (U_b - U_{be}) / R_b$$

■ 集电极电流

$$I_c = \beta I_b = (U_b - U_{be}) \beta / R_b$$

■ 集-射极电压

$$u_{ce} = U_c - I_c R_c = U_c - (U_b - U_{be}) \beta R_c / R_b$$

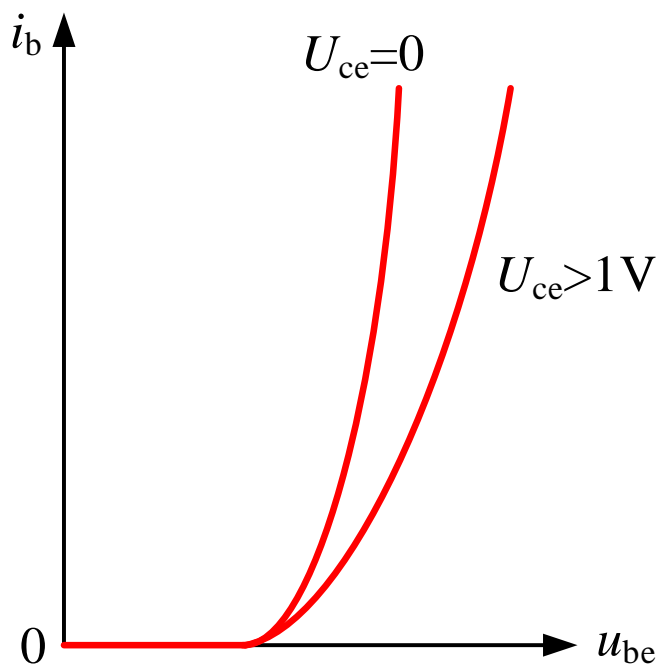
■ 临界饱和基极电流

$$I_{bs} = I_{cs} / \beta$$

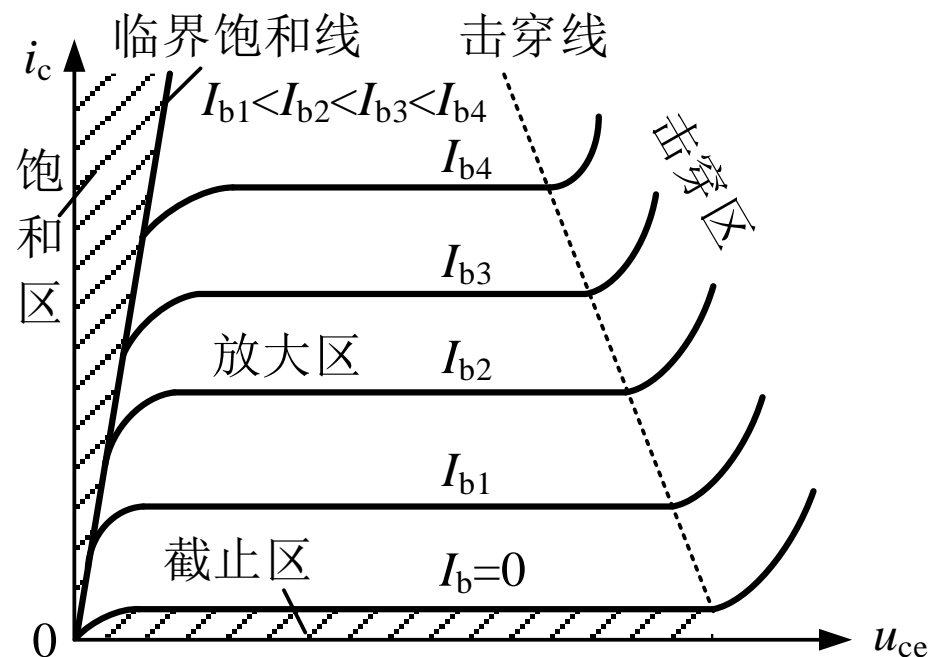
■ 过驱动系数

$$ODF = I_b / I_{bs}$$

BJT的稳态特性



输入特性

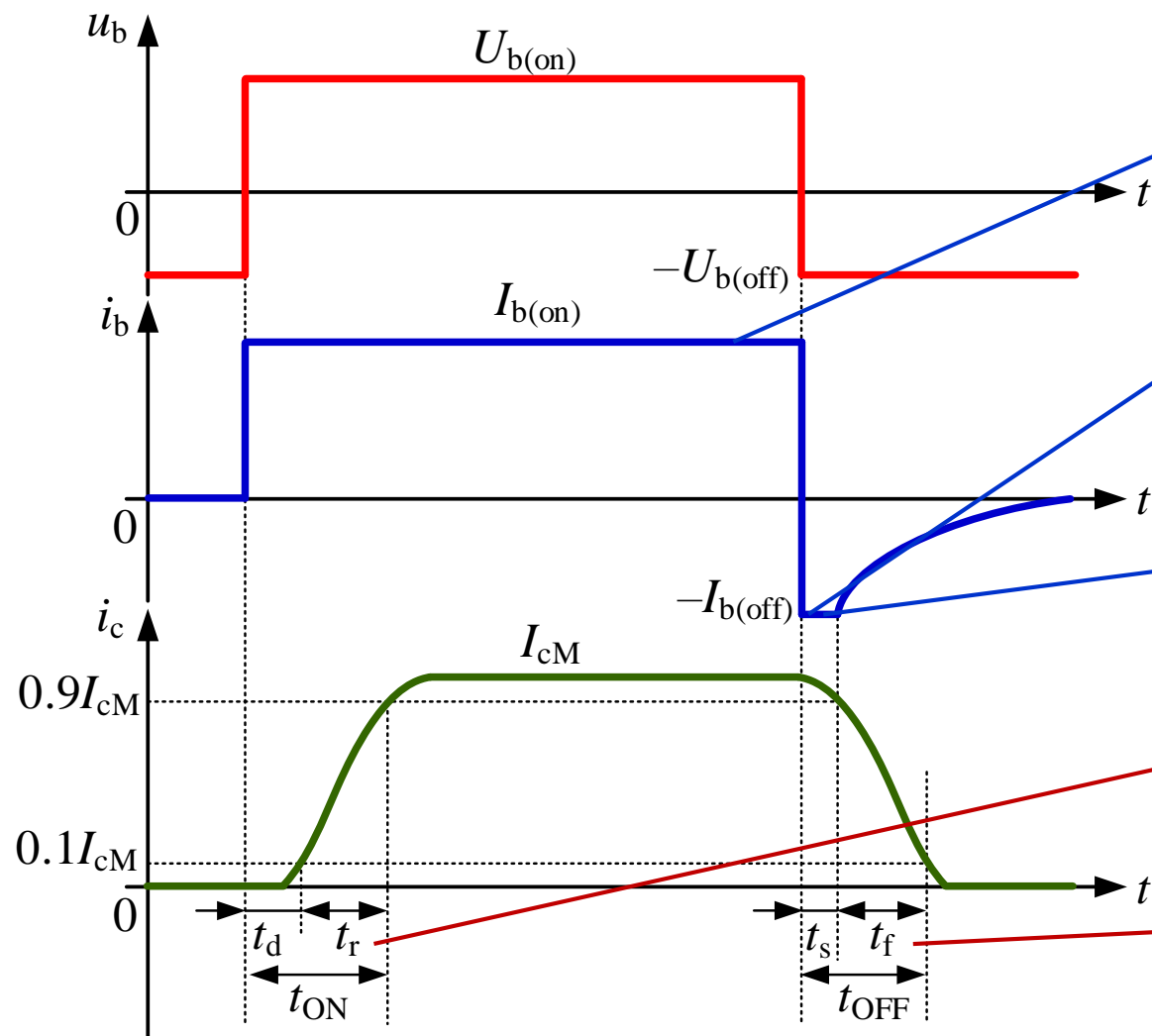


输出特性

- 与二极管 PN 结的正向伏安特性曲线相似。
- 当 U_{ce} 大于 2V 后, U_{ce} 数值的改变对输入特性曲线影响很小。

- 在截止区, BJT 基极电流为零, 两个 PN 结都反偏。
- 在放大区, 基极电流大于零, b-e 结正偏, b-c 结反偏。
- 在饱和区, 两个 PN 结都正偏。

BJT的动态特性



稳态导通时，驱动电流大于 I_{bs} ，过多的少数载流子将存储在基区。ODF 越大，基区存储电荷越多。

基极电流反向，此电流将抽取基区过剩的存储电荷。

反向基极电流越大，存储电荷越容易被复合，恢复时间越短。

延迟时间 t_d 和上升时间 t_r 之和称为开通时间 t_{ON}

存储时间 t_s 和下降时间 t_f 之和称为关断时间 t_{OFF}

BJT的主要参数

■ 额定电压 $U_{(BR)CE}$

指集电极-发射极之间的正向击穿电压值。

■ 额定电流（最大允许电流） I_{CM}

一般根据最大集电极电流的 1.5 倍来选择额定电流。

■ 饱和压降 U_{CES}

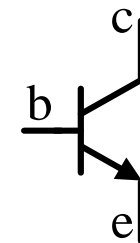
是指在规定集电极电流和基极电流（或 ODF）下的集-射极之间的饱和压降。

■ 最大耗散功率 P_{CM}

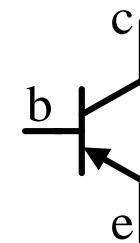
是指在最高工作温度下允许的耗散功率。

■ 二次击穿曲线与安全工作区（Safe Operation Area, SOA）

二次击穿是 BJT 特有的现象。一次击穿是雪崩击穿。二次击穿是永久性损坏。



NPN型



PNP型

二次击穿和安全工作区

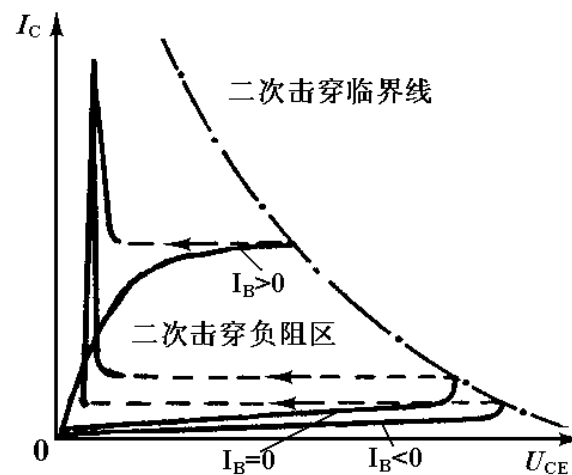
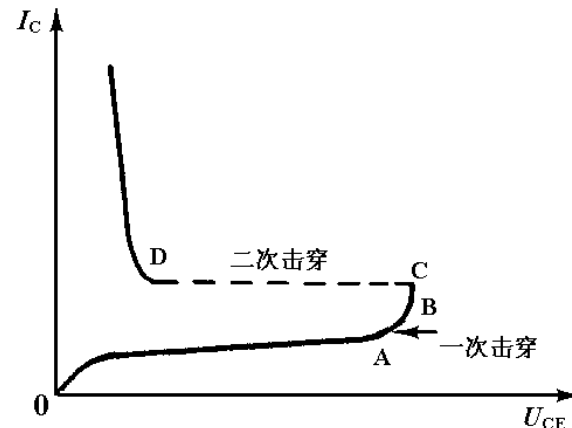
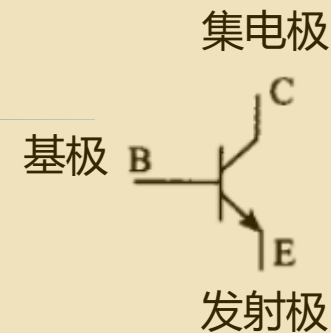
■ 二次击穿现象

- **一次击穿**：集电极电压升高至击穿电压 U_{CEO} 时， I_c **迅速增大**，出现击穿现象（AB段），称为一次击穿。只要 I_c 不超过限度，**一般不会损坏**，工作特性也不变。

$$U_{ce} \uparrow \Rightarrow U_{ceo}, i_c \uparrow \uparrow$$

- **二次击穿**：继续增加 U_{CE} ， I_c **急剧上升**，**电压陡然下降**。出现**低电压，大电流**状态的跃变，称二次击穿，**元件损坏**。

$$U_{ce} \text{ 仍 } \uparrow, i_c \uparrow \Rightarrow \text{达C点}$$



3.4 功率场效应晶体管

3.4.1 基本结构与工作原理

3.4.2 MOSFET的稳态特性

3.4.3 MOSFET的动态特性

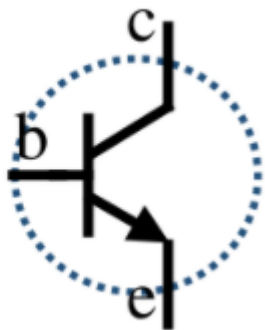
3.4.4 MOSFET的主要参数

3.4.5 宽禁带半导体场效应晶体管



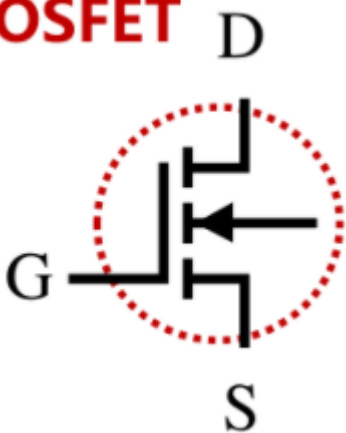
基本结构与工作原理

BJT



- 工作频率提高，BJT开关损耗增大；
- 电流控制型器件，大功率BJT的 β 很低，一般在20以下，驱动功率很大；
- 存在二次击穿问题，必须仔细设置缓冲电路。

MOSFET



- 开关速度快，开关损耗小；
- 电压控制型器件，驱动功率更小；
- 无二次击穿问题。

基本结构与工作原理

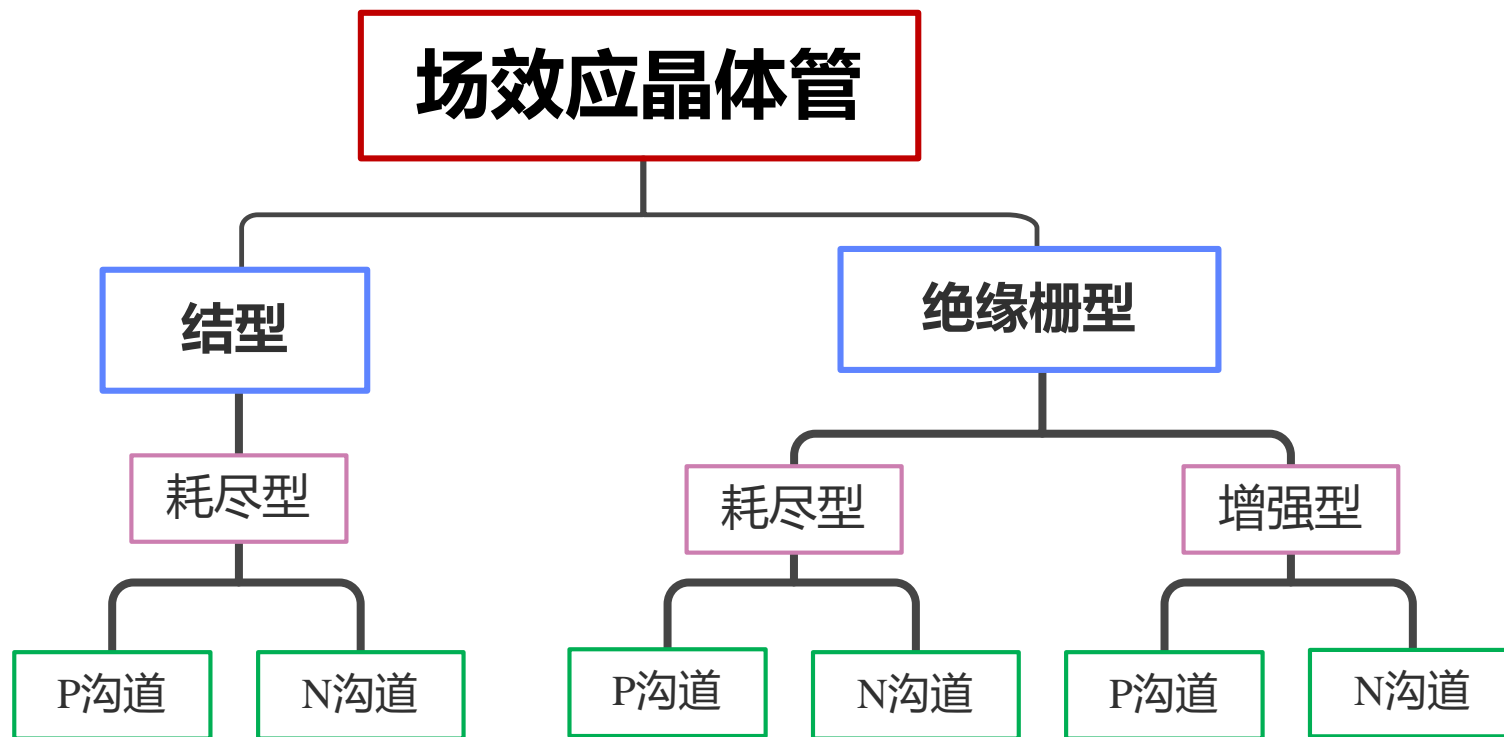
MOSFET--Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, 金属氧化物半导体场效应晶体管,

- 结型

外加电场控制场效应晶体管栅-源之间 PN 结耗尽区的宽度来控制沟道电导

- 绝缘栅型

栅-源之间是用硅氧化物介质将金属电极和半导体隔离, 利用外加电场控制半导体中感应电荷量的变化控制沟道电导



基本结构与工作原理

MOSFET--Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, 金属氧化物半导体场效应晶体管,

- 耗尽型

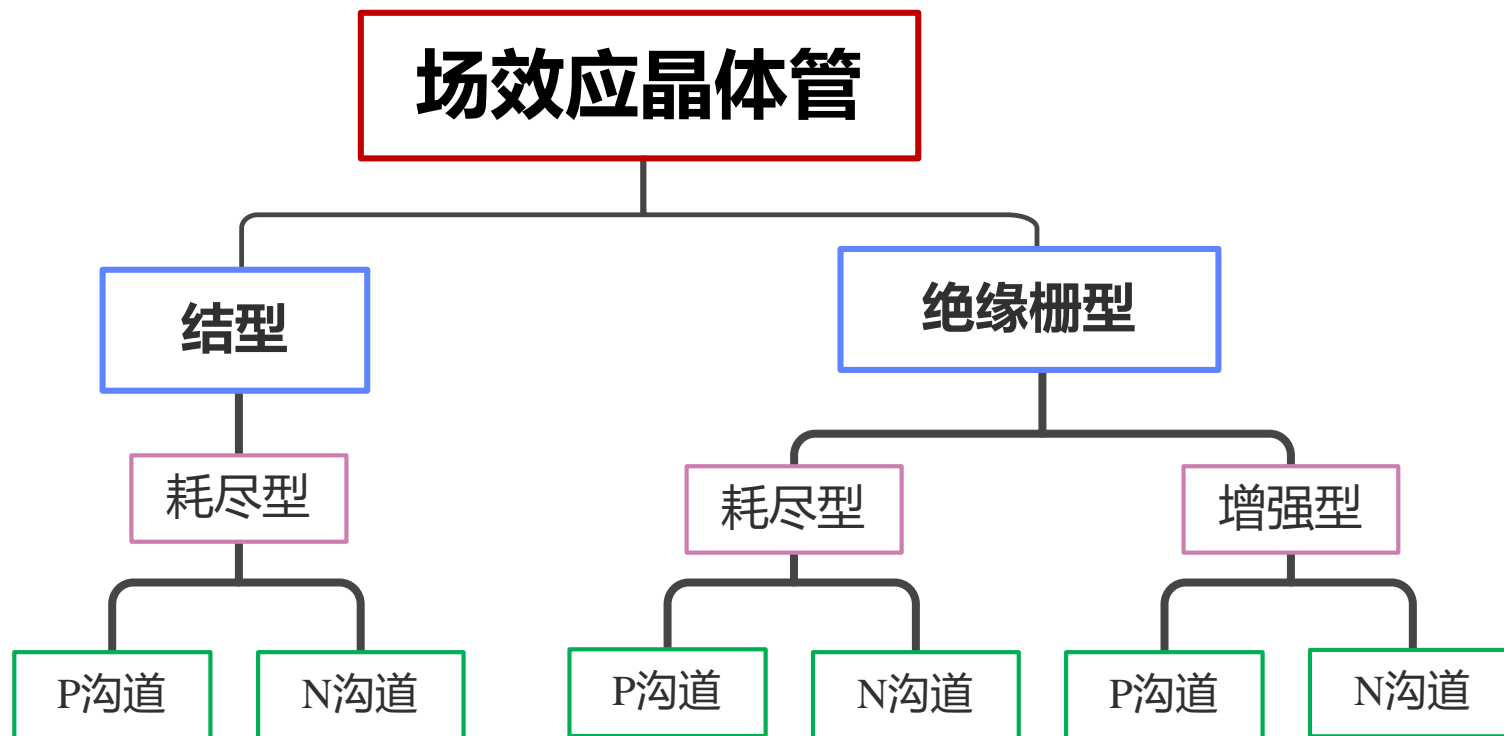
当栅极电压为**零**时漏源极之间就存在导电沟道。

- 增强型

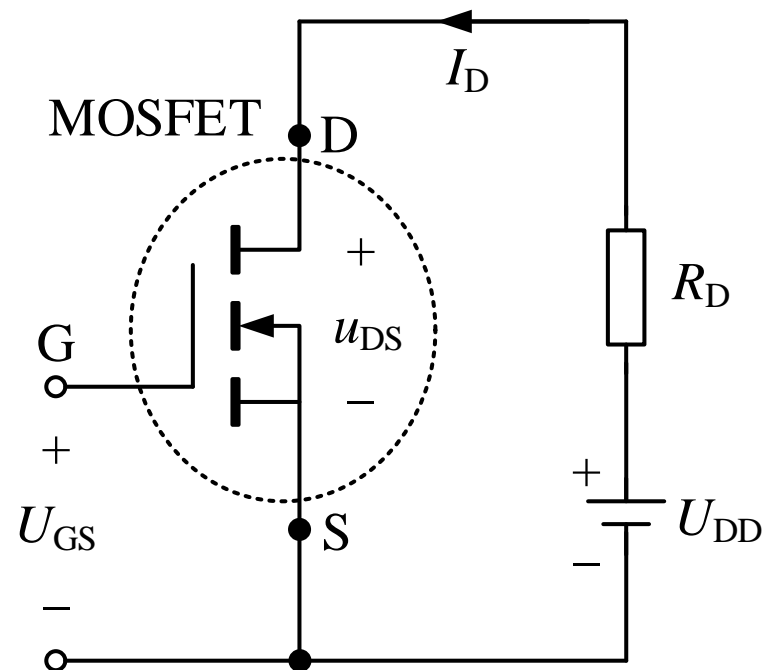
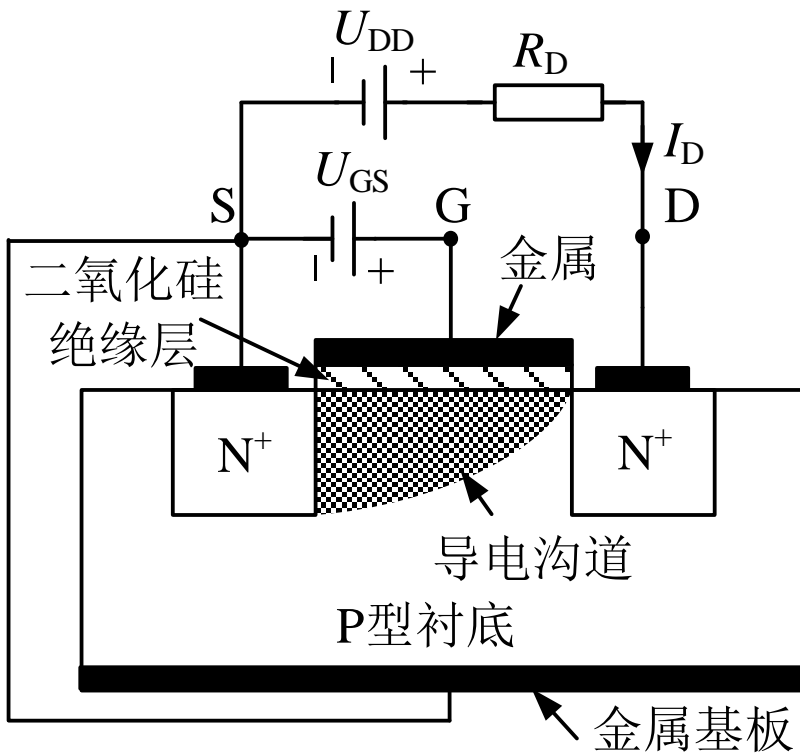
对于N(P)沟道器件, 栅极电压**大于**
(**小于**) 零时才存在导电沟道。

- 沟道性质

按导电沟道性质可分为P沟道和N沟道, 功率场效应晶体管主要是N沟道增强型。

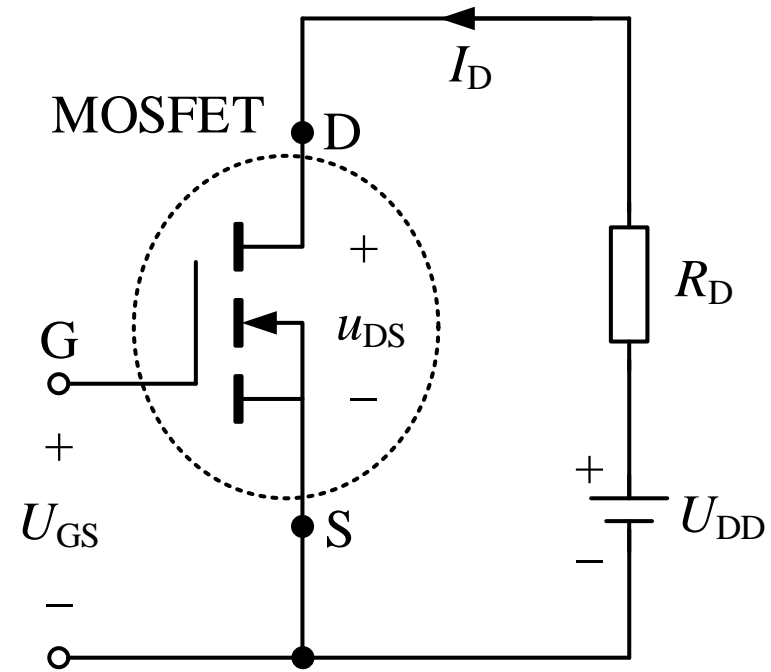
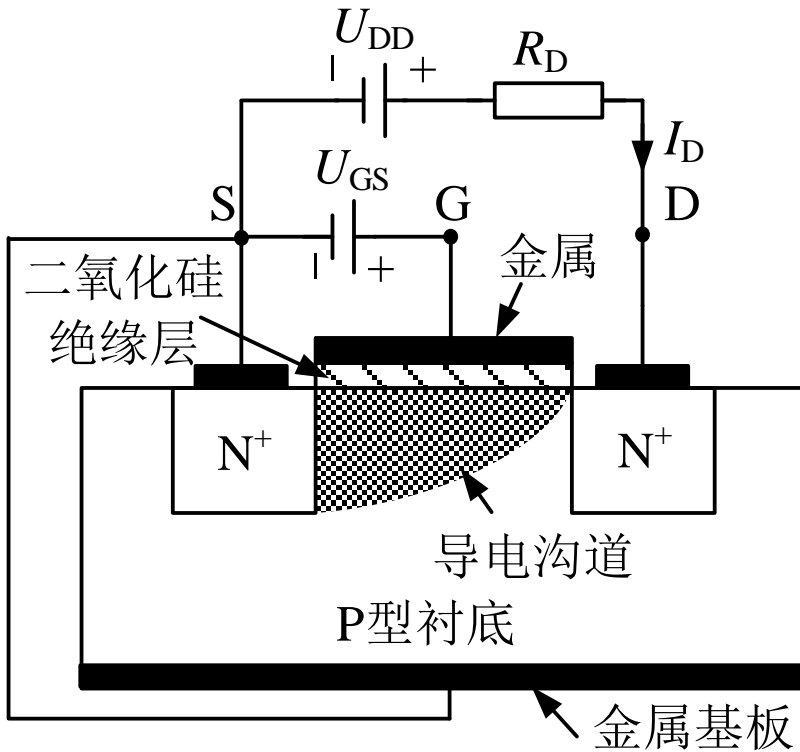


场效应晶体管的结构和原理



- 通常在制造时，将P型衬底和源极S短接。
- 栅极金属极板与P型半导体衬底之间由二氧化硅绝缘层隔离，相当于一个电容。
- $U_{GS}=0$ 时，在漏-源之间加上正或负电压，由于漏-源之间是N-P-N结构，总有一个PN结处于反向阻断，不可能产生电流。

场效应晶体管的结构和原理



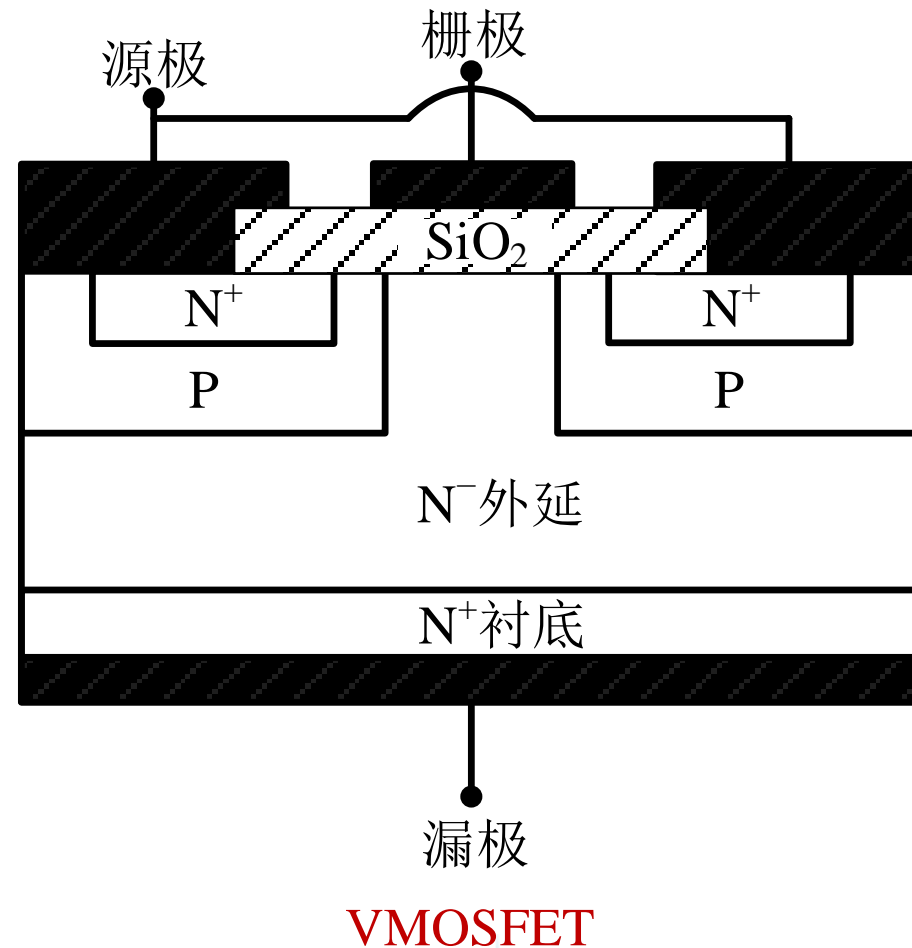
- 在 G-S 之间加正电压 U_{GS} ，栅极极板上存储正电荷，产生的电场将 P 型半导体中的多子--空穴推开远离栅极，将少子--电子吸引到栅极下的 P 型半导体表面上。
- 当 U_{GS} 大于 U_T (开启电压) 时，栅极下 P 型半导体表面的自由电子浓度超过空穴浓度，使 P 型半导体反型为 N 型半导体。
- 漏极和源极被反型层连通，形成导电沟道。

功率MOSFET的结构和原理

- 场效应晶体管三个电极在一个平面上，沟道不能做的很短，沟道电阻大。
- 导电沟道是由表面感应电荷形成的，沟道电流是表面电流，载流能力差。

VMOSFET:

- ✓ 精确控制沟道长度，使沟道电阻减少。
- ✓ 采用低掺杂的 N^- 漂移区（外延层），提高了漏-源击穿电压。
- ✓ 沟道面积比平面结构大而短，提高了载流能力。

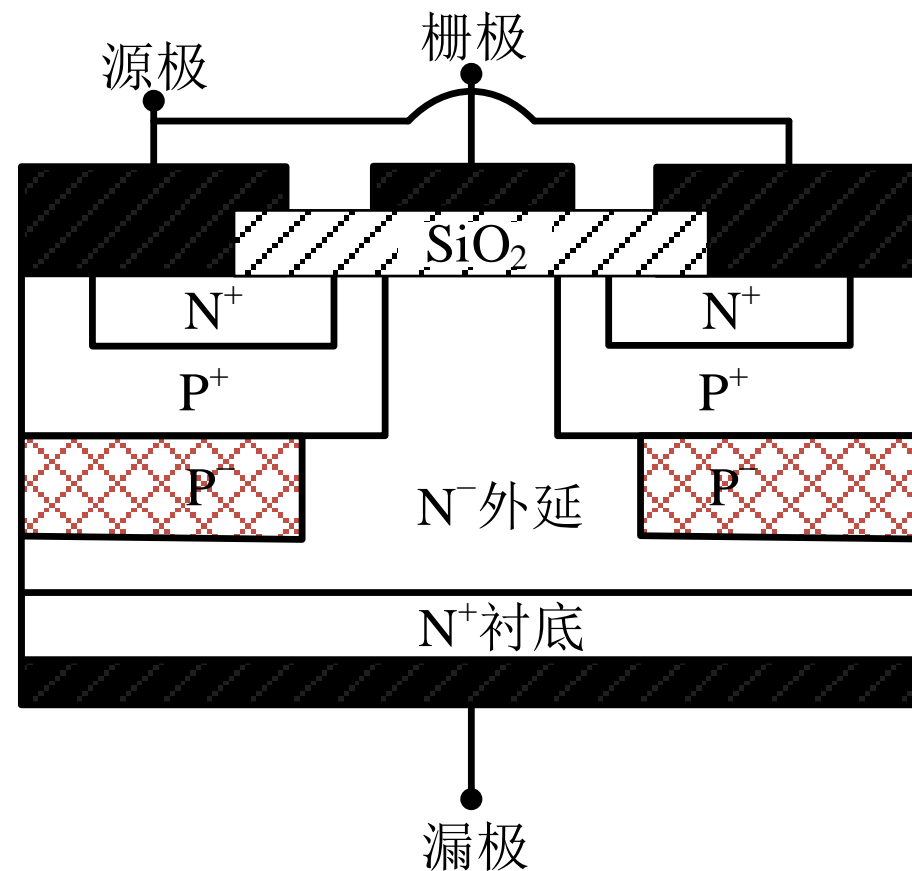


功率MOSFET的结构和原理

- 在 VMOSFET 结构中，高击穿电压和低导通电阻很难兼得。

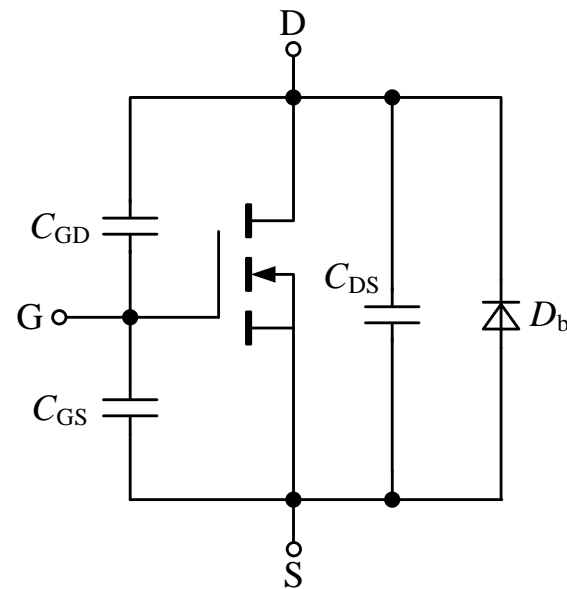
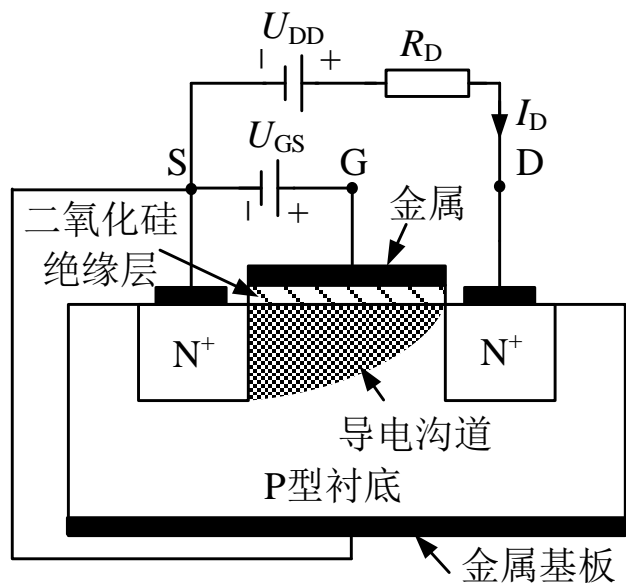
CoolMOS:

- ✓ 超结全称为超级 PN 结，超结器件结构的核心在于漂移区中交替的 P/N 层结构。
- ✓ 提高了漂移区的掺杂浓度，大大降低了导通电阻，同时不改变器件的击穿电压值。
- ✓ 具有高开关速度。



CoolMOS

功率MOSFET的寄生参数



结电容

输入电容 $C_{iss} = C_{GS} + C_{GD}$ (C_{DS} 短接)

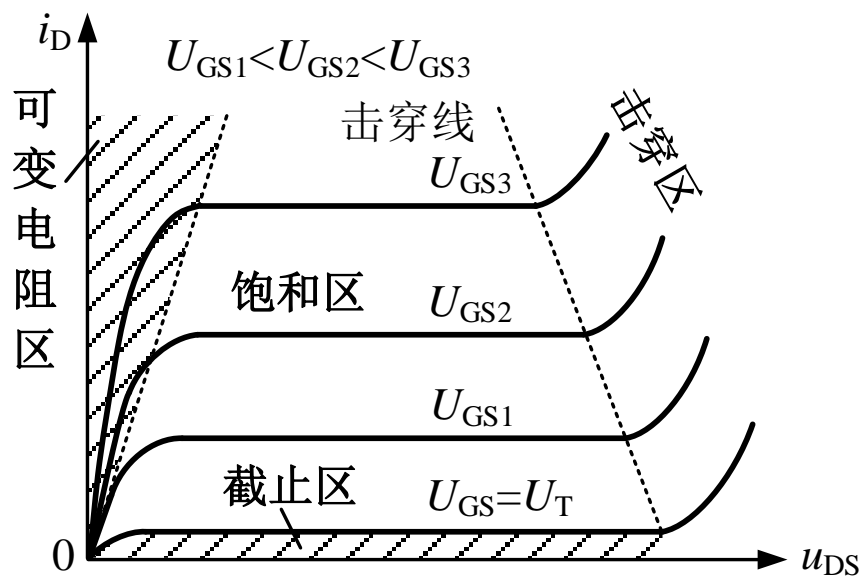
输出电容 $C_{oss} = C_{DS} + C_{GD}$ (C_{GS} 短接)

反馈电容 $C_{rss} = C_{GD}$

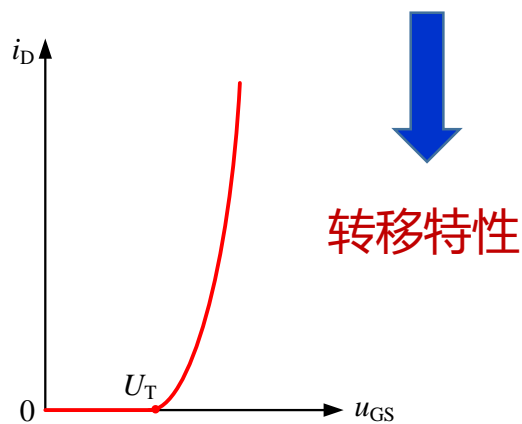
寄生二极管（体二极管）

- 寄生二极管反向恢复时间一般较长。
- 如果在晶体管导通之前使寄生二极管导通，将晶体管两端电压箝位在0，可实现晶体管零电压导通。

MOSFET的稳态特性



输出特性



转移特性

- 可变电阻区 $u_{DS} < U_{GS} - U_T$

在可变电阻区，相当于一个电阻，此电阻随 U_{GS} 的增大而减小。MOSFET 导通时即工作在这个区域。

- 截止区 U_{GS}

在截止区，漏极电流 i_D 为零。

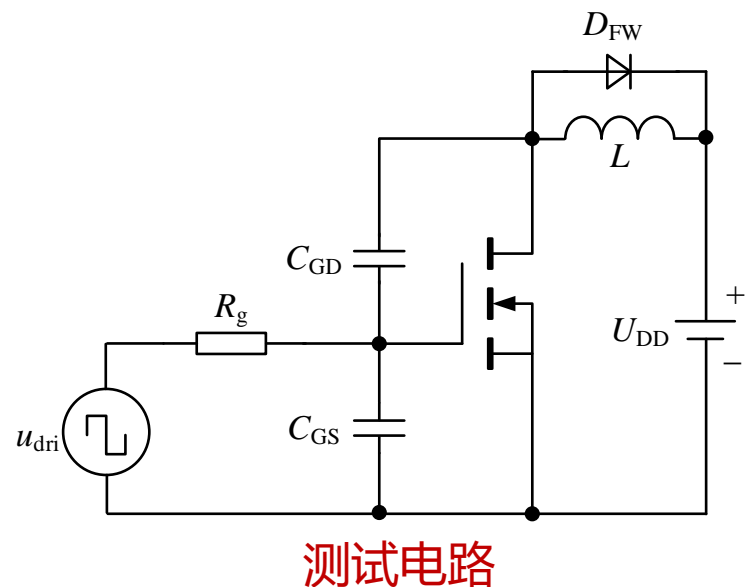
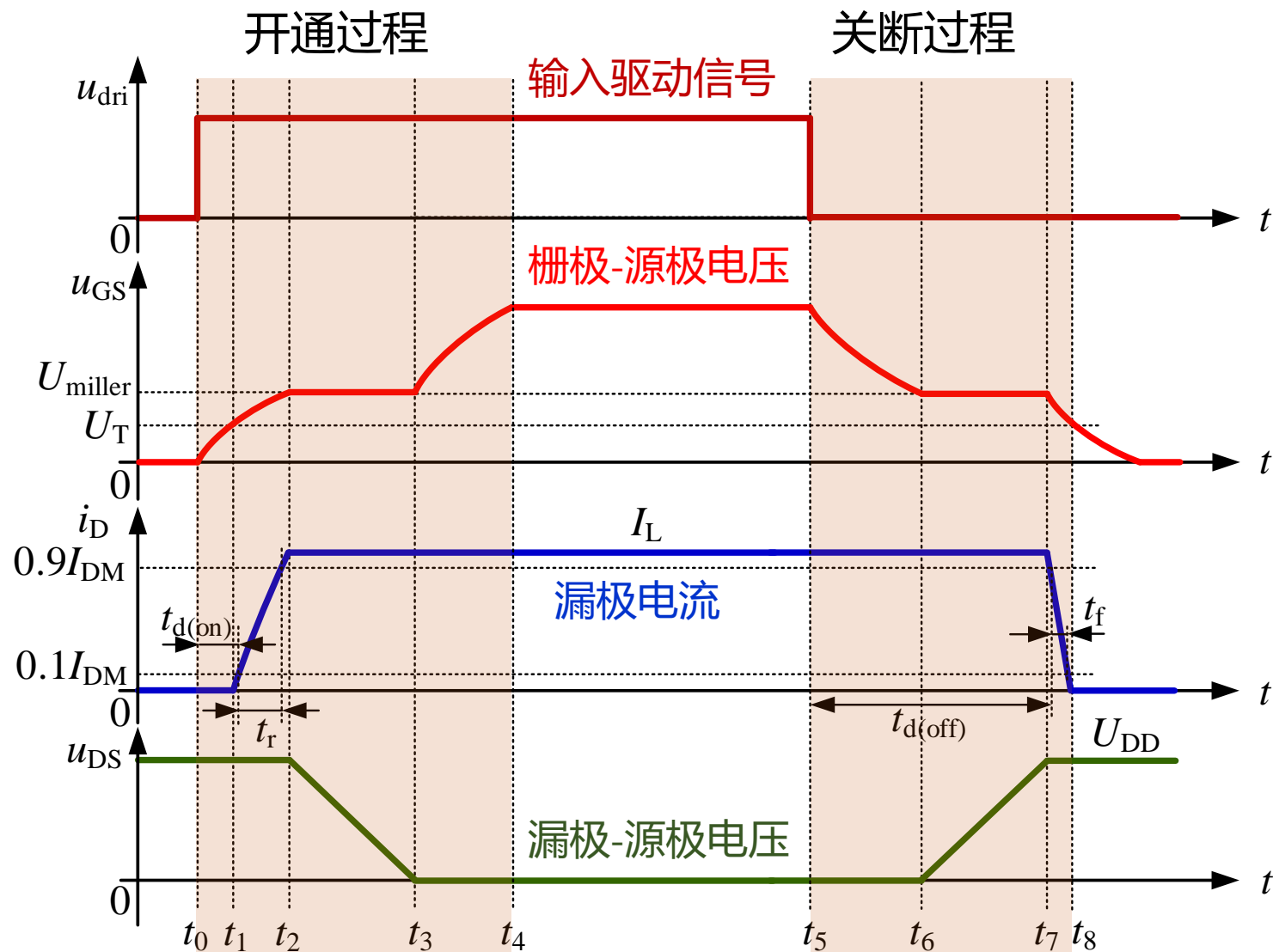
- 击穿区

当 u_{DS} 加大到一定数值以后，漏极附近 PN 结发生击穿，漏电流迅速增大，曲线上翘，进入击穿区。

- 饱和区 $u_{DS} > U_{GS} - U_T$

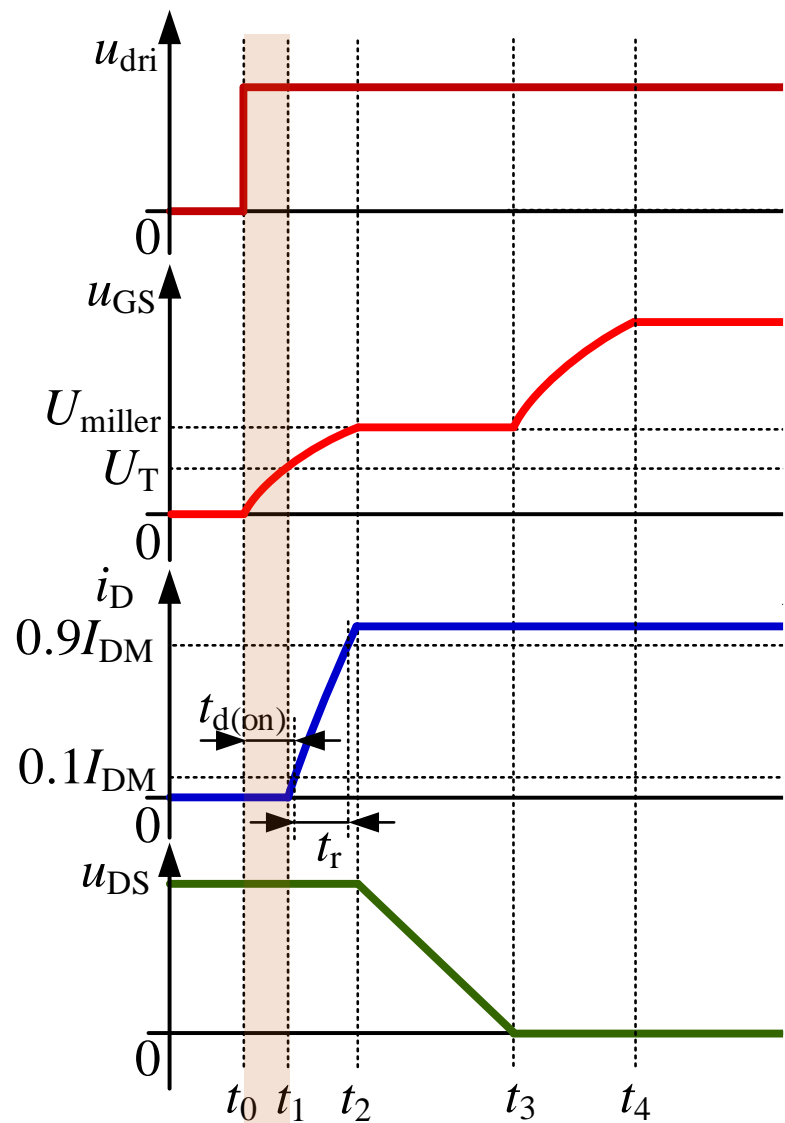
在饱和区，漏极电流近似为一个常数。

MOSFET的动态特性

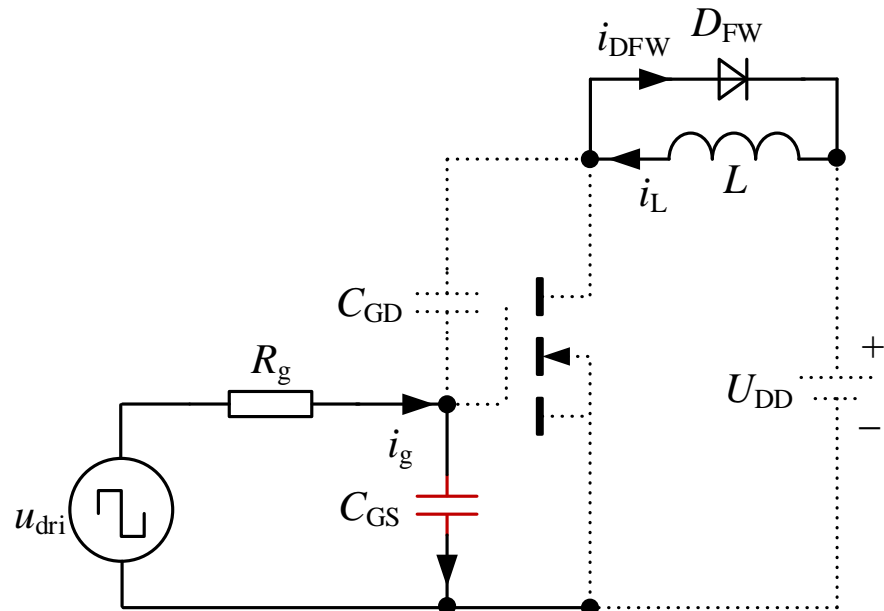


- $t_{d(on)}$ —— 开通延迟时间
- t_r —— 上升时间
- $t_{d(off)}$ —— 关断延迟时间
- t_f —— 下降时间

MOSFET的动态特性

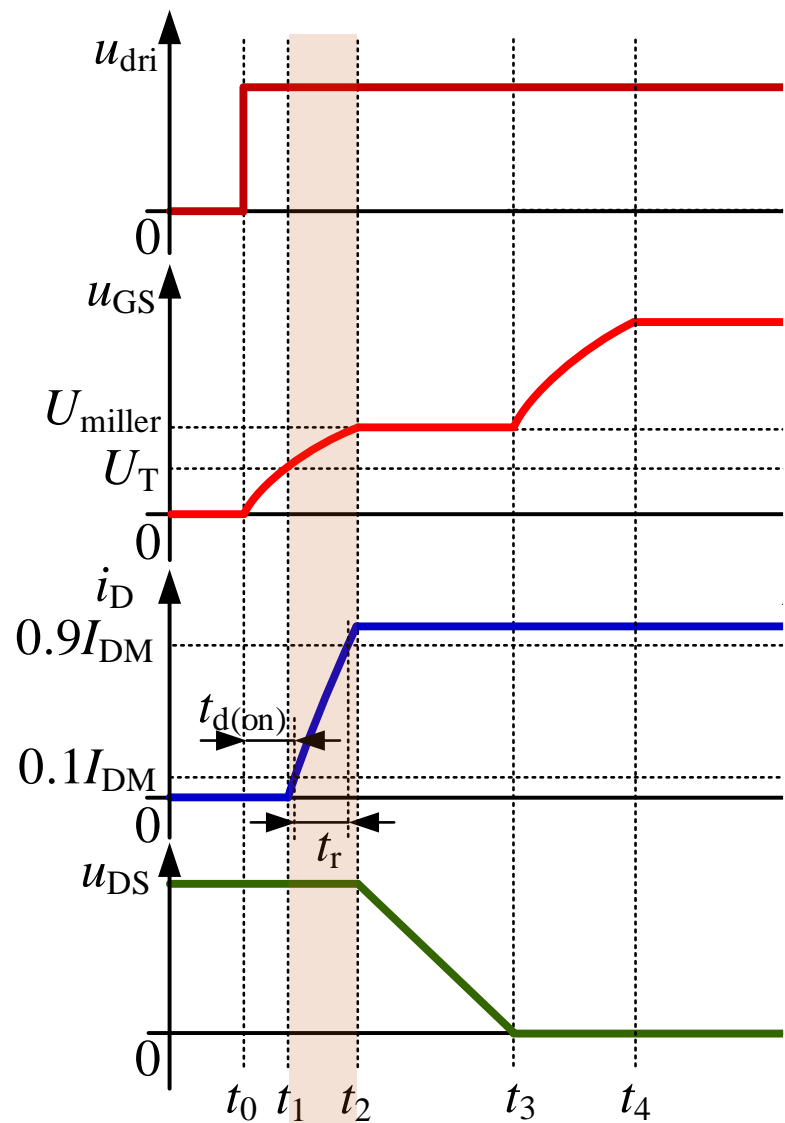


$[t_0, t_1]$

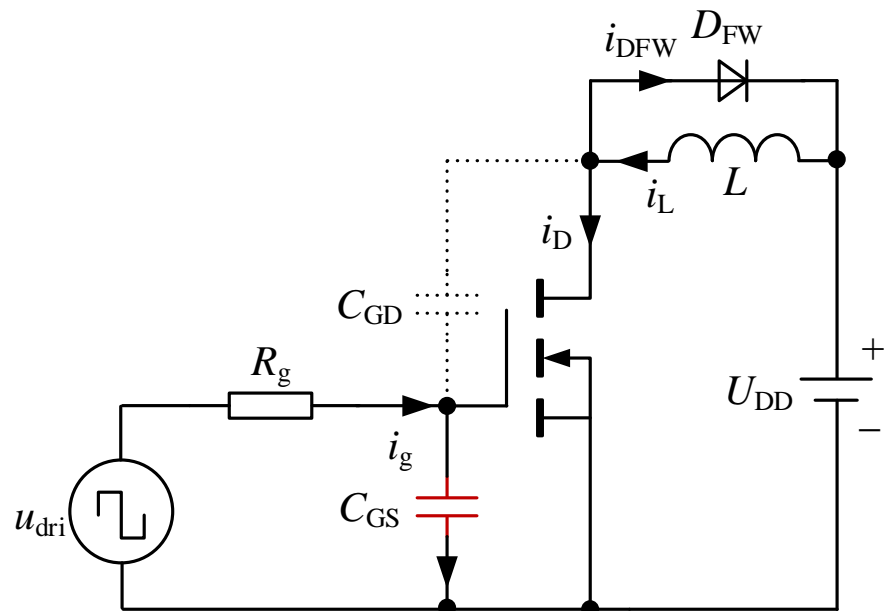


- 在 t_0 时刻, u_{dri} 变为高电平, 并通过 R_g 为 C_{GS} 充电, 栅源极电压 u_{GS} 呈指数曲线上升。
- 由于 u_{GS} 小于开启电压 U_T , MOSFET 尚未开通。

MOSFET的动态特性

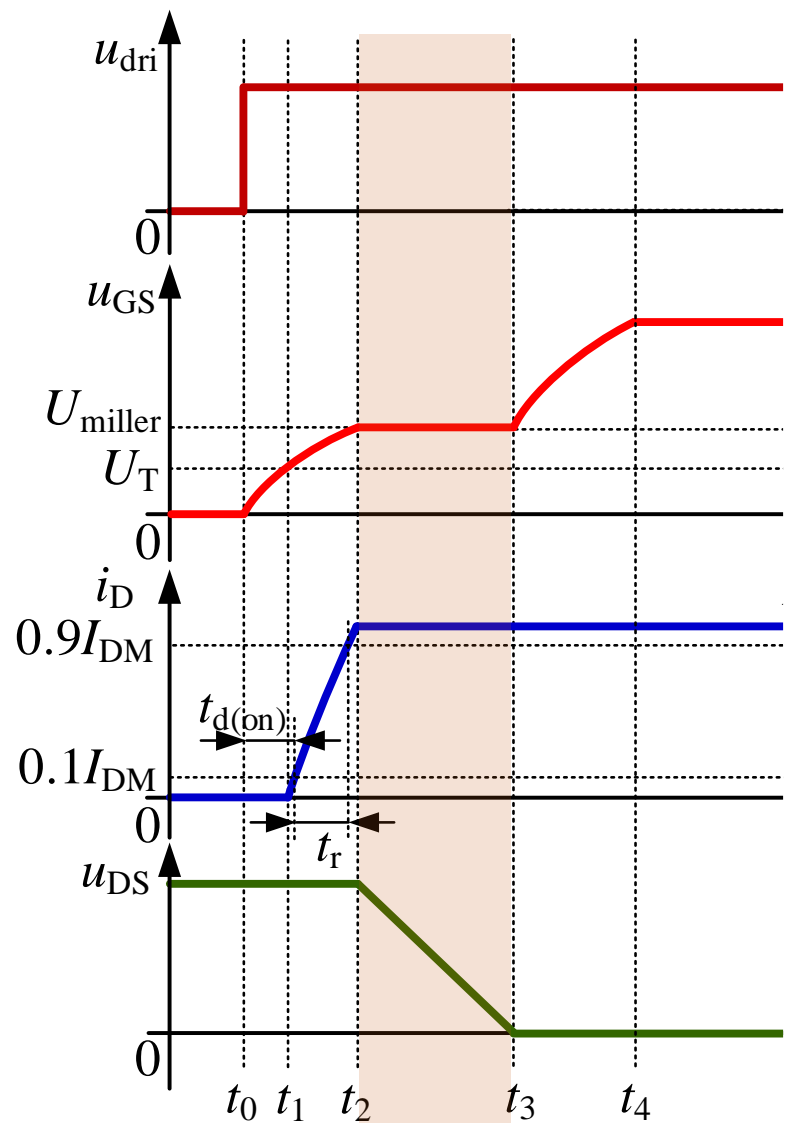


$[t_1, t_2]$

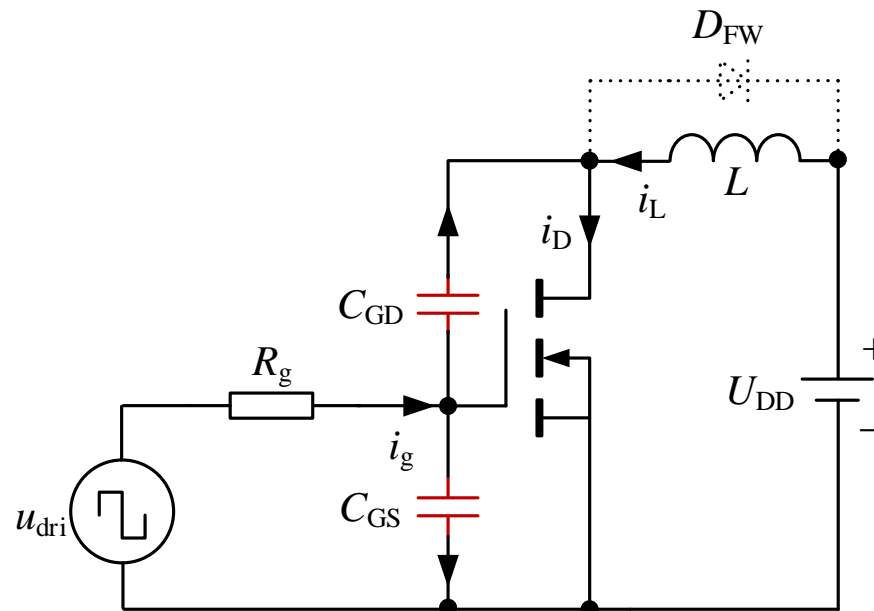


- 在 t_1 时刻, u_{GS} 上升到 U_T , MOSFET 的导电沟道形成, 产生漏极电流 i_D 。
- 在 i_D 尚未达到电感电流 i_L 的过程中, D_{FW} 维持导通, 漏源极电压 u_{DS} 基本保持不变, u_{GS} 继续呈指数曲线上升。

MOSFET的动态特性

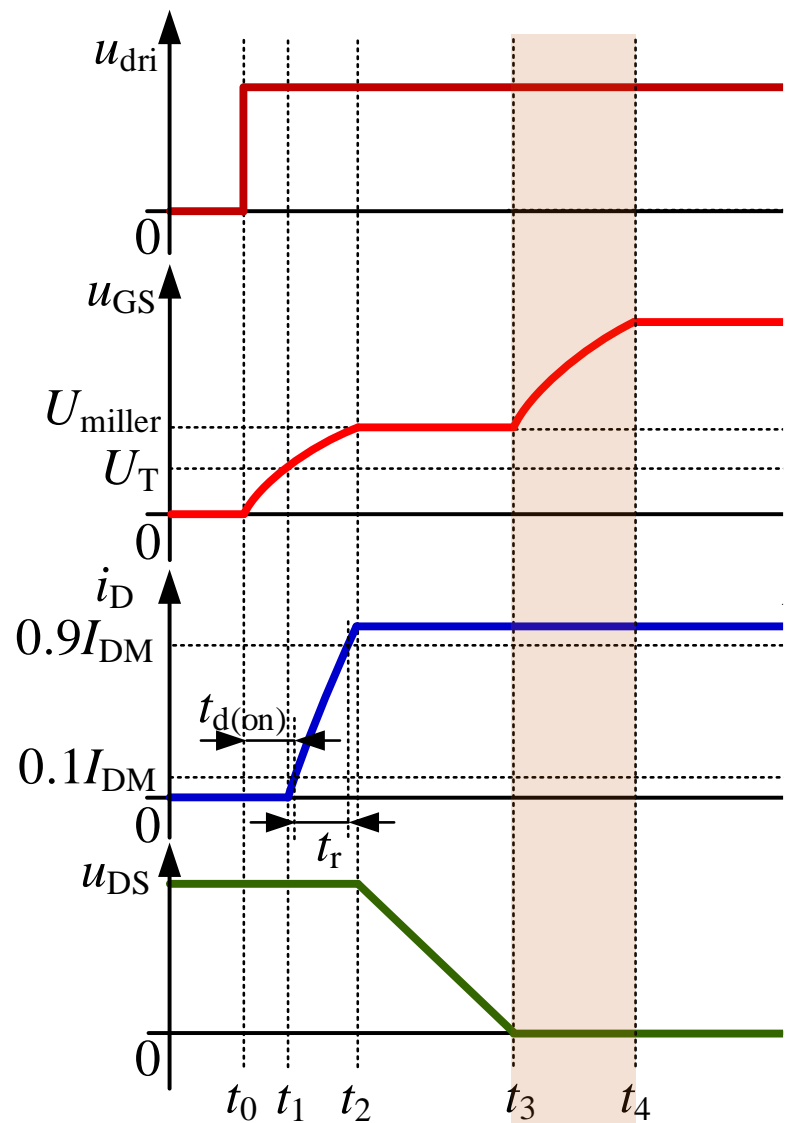


$[t_2, t_3]$

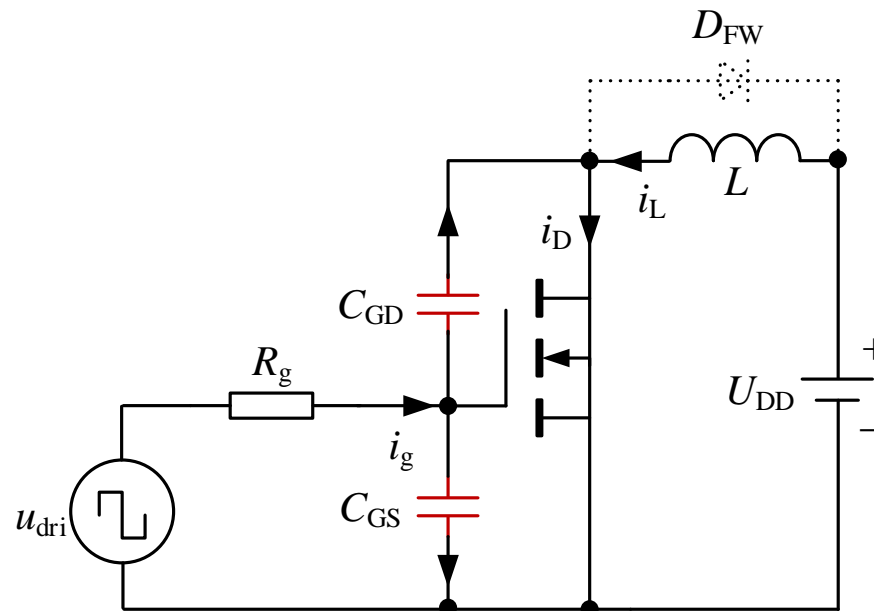


- t_2 时刻, i_D 与 i_L 相等, D_{FW} 关断, u_{DS} 开始下降。
- 由于 u_{DS} 下降速度快, 因此驱动电流中的大部分先为 C_{GD} 放电, 进而再为 C_{GD} 反向充电。
- C_{GS} 所在支路电流很小, 可近似忽略, 因此 u_{GS} 基本保持不变, 呈现一段平台波形, 称为**密勒平台**。

MOSFET的动态特性



$[t_3, t_4]$



- t_3 时刻, u_{DS} 下降到零, MOSFET 完全导通, 由于 u_{DS} 不再变化, 因此 C_{GD} 所在支路电流很小。
- 驱动电流中的大部分继续为 C_{GS} 充电, 直至 t_4 时刻 u_{GS} 达到稳态值。

MOSFET的主要参数

■ 导通电阻 $R_{DS(on)}$

导通电阻的大小决定器件的导通损耗。具有正温度系数，有利于并联均流。

■ 开启电压 U_T

MOSFET开通时的栅-源电压值。

■ 漏-源击穿电压 $U_{(BR)DS}$

MOSFET 的最高工作电压。按电路中 MOSFET 电压应力的 1.5 倍选取。

■ 栅-源击穿电压 $U_{(BR)GS}$

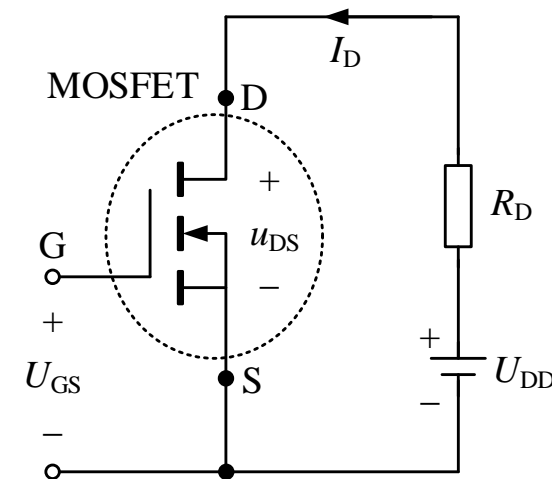
栅极和源极之间绝缘层的**击穿电压**，一般在栅源极间并联电阻实现**静电泄放**。

■ 最大允许漏极电流 I_{DM}

按MOSFET 电流应力的 1.5 倍选取。

■ 最大允许功率损耗 P_{DM}

最高结温不超过晶体管的最高允许结温 时的允许功耗值。



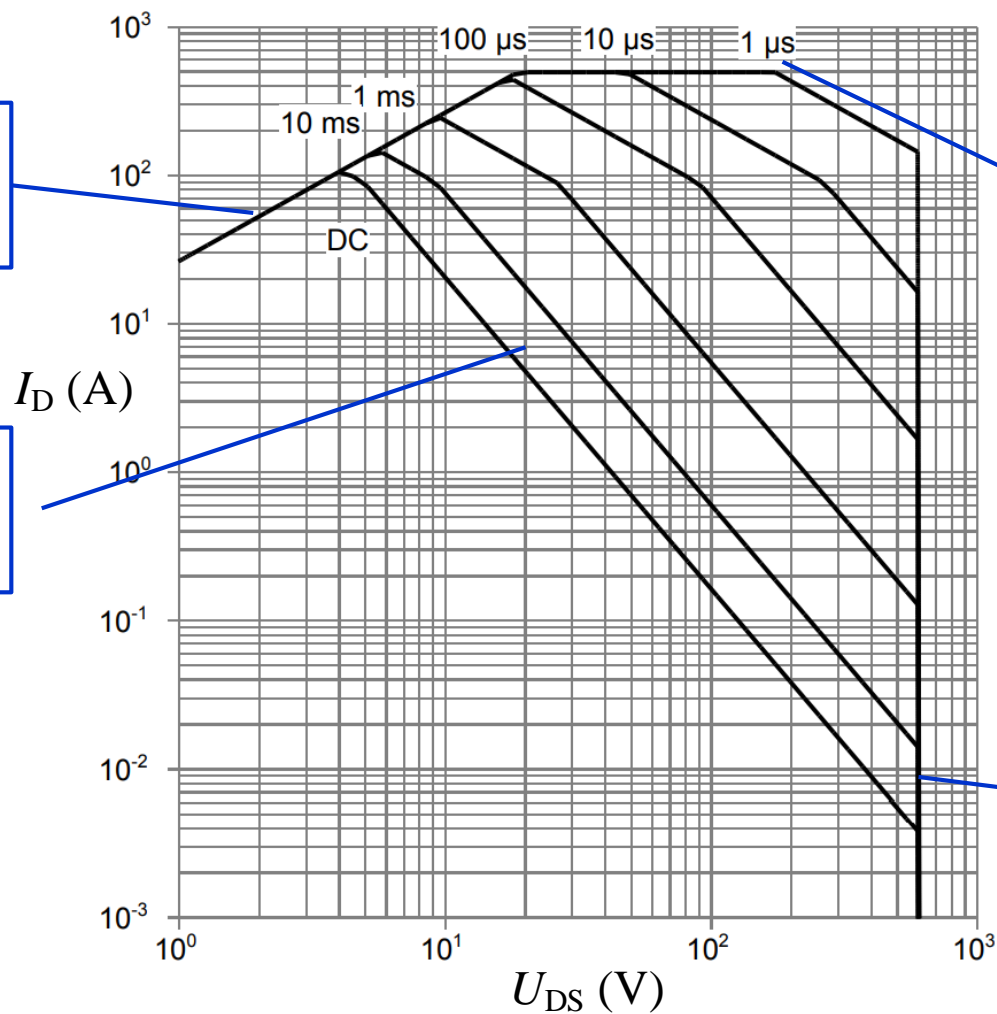
$$R_D = kU_{(BR)DS}^{1.8 \sim 2.7}$$

$$P_{DM} = \left(\frac{T_{jM} - T_a}{T_{jM} - 25^{\circ}\text{C}} \right) P_{DMT}$$

MOSFET的主要参数

MOSFET 导通电阻限制线，限制了器件的工作电流。

等功耗线 P_{DM} ，对应不同脉冲宽度下的功率损耗限制。



最大脉冲漏极电流 I_{DM}

最大漏源击穿电压 $U_{(BR)DS}$

MOSFET安全工作区





3.5 绝缘栅双极型晶体管

3.5.1 基本结构与工作原理

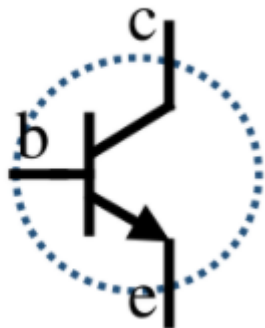
3.5.2 IGBT的基本特性

3.5.3 IGBT的主要参数



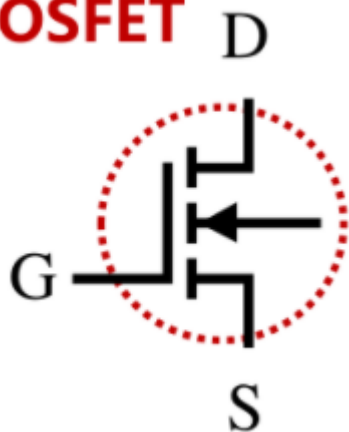
基本结构与工作原理

BJT

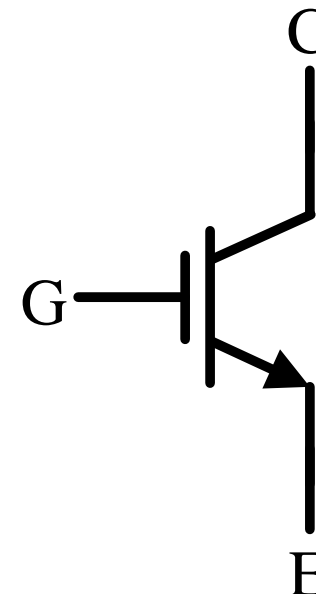


- 导通压降低
- 开关速度慢
- 驱动功率大

MOSFET



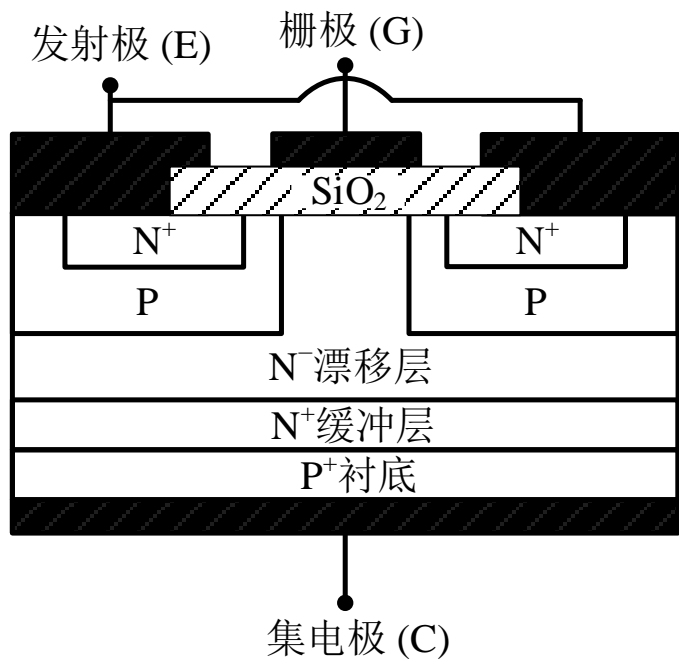
- 开关速度快
- 驱动电流小
- 导通电阻大



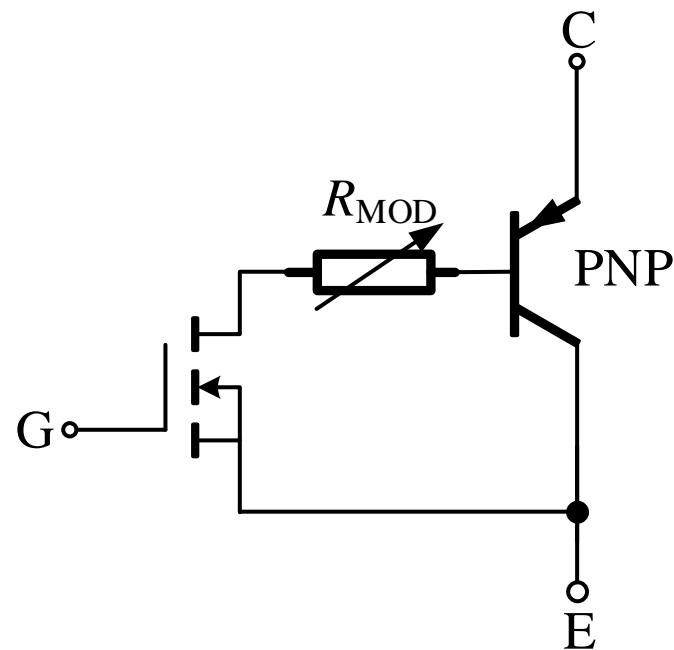
绝缘栅双极型晶体管

Insulated Gate Bipolar Transistor

基本结构与工作原理



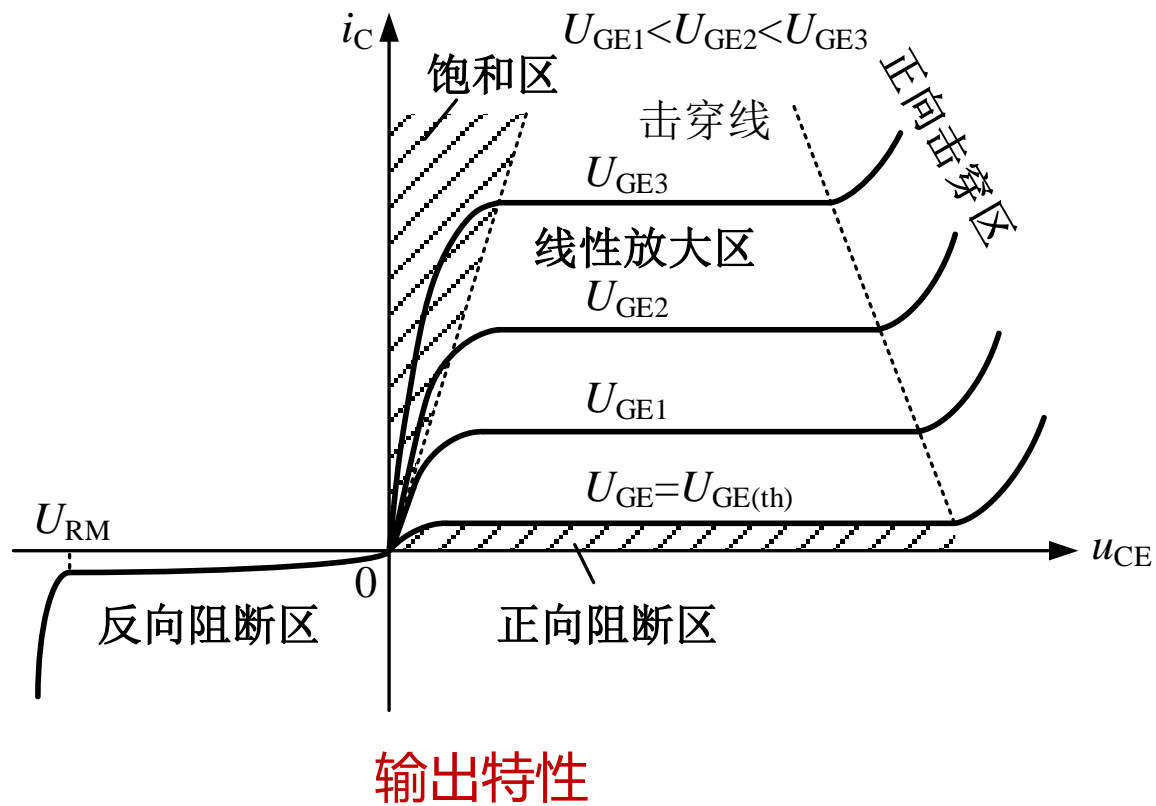
IGBT内部结构



等效电路图

- 在重掺杂 P⁺衬底上生长一层 N⁻ 漂移层，再在漂移层上制造出栅极和源极。
- 在 P⁺和 N⁻ 之间增加一层 N⁺缓冲层，降低 IGBT的导通压降。

IGBT的静态特性



- 线性放大区

以 **BJT** 特性为主，电压和电流都很大，损耗也大。

- 饱和区

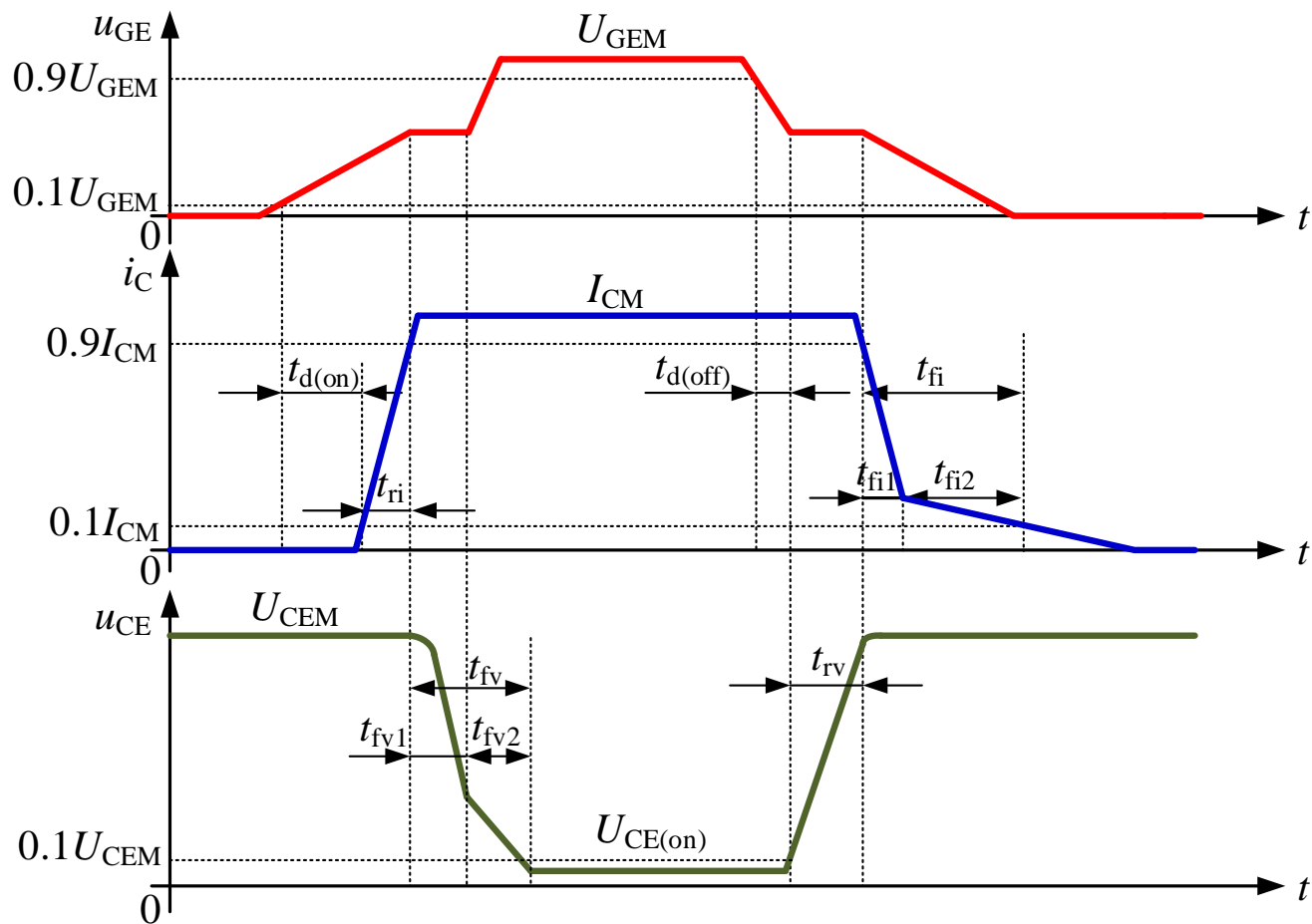
以 **MOSFET** 特性为主， u_{GE} 越高，饱和电流越大。

- 反向阻断区

当 $u_{CE} < 0$ 时，IGBT 为反向工作状态，只有很小的集电极漏电流流过， U_{RM} 是 IGBT 能够承受的最高反向阻断电压。

- 在电力电子变换器中，IGBT 工作在开关状态，即工作在**正向阻断区**或**饱和区**。

IGBT的动态特性



- t_{fv1} 为 IGBT 中 MOSFET 单独工作的电压下降过程，由于 MOSFET 的密勒效应，该过程中 u_{GE} 基本保持不变。
- t_{fi2} 对应 IGBT 内部 PNP 晶体管的关断过程，由于 PNP 晶体管基区载流子高注入，存储电荷无法用外加反向抽流使其迅速消失，只能靠自然复合消失。这就出现 IGBT 关断时特有的**电流拖尾现象**，使得下降时间加长，造成较大的关断损耗。



IGBT的主要参数

■ 饱和压降 $U_{CE(sat)}$

IGBT饱和导通压降，直接决定IGBT的导通损耗。一般为 2~3V。

■ 最大开路电压 $U_{(BR)CEO}$

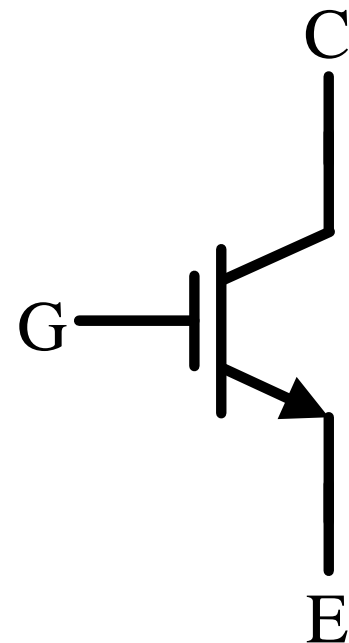
在实际应用中，应根据电压应力的 1.5 倍选择 IGBT 的额定电压。

■ 集电极最大电流 $I_{C(max)}$

实际设计时，按照 IGBT电流应力的 1.5 倍来选择额定电流。

■ 最大集电极功耗 P_{CM}

在室温 25°C的情况下，IGBT 工作时允许产生的最大耗散功率。



本章内容

	Diode	SCR	BJT	MOSFET	IGBT
可控性	不控	半控	全控	全控	全控
驱动类型	/	电流型	电流型	电压型	电压型
导电载流子	空穴、电子	空穴、电子	空穴、电子双极型	电子单极型	空穴、电子双极型
其他特点	负温度系数、反向恢复	开通关断条件	导通压降与关断速度的矛盾	导通电阻正温度系数	电流拖尾现象
适用场合	低频~高频 小功率~大功率	低频 大功率	低频 大功率	高频（50k以上） 中小功率	中高频（20k-100k） 中大功率

