

1.4.1 门极可关断晶闸管 -- 自学

1.4.2 电力晶体管

1.4.3 电力场效应晶体管

1.4.4 绝缘栅双极晶体管

■ 电力晶体管（Giant Transistor——GTR）

按英文直译为巨型晶体管，是一种耐高电压、大电流的**双极结型晶体管（Bipolar Junction Transistor——BJT）**

Power BJT

■ GTR的结构和工作原理

- ◆ 与普通的双极结型晶体管基本原理是一样的。
- ◆ 最主要的特性是**耐压高、电流大、开关特性好。**

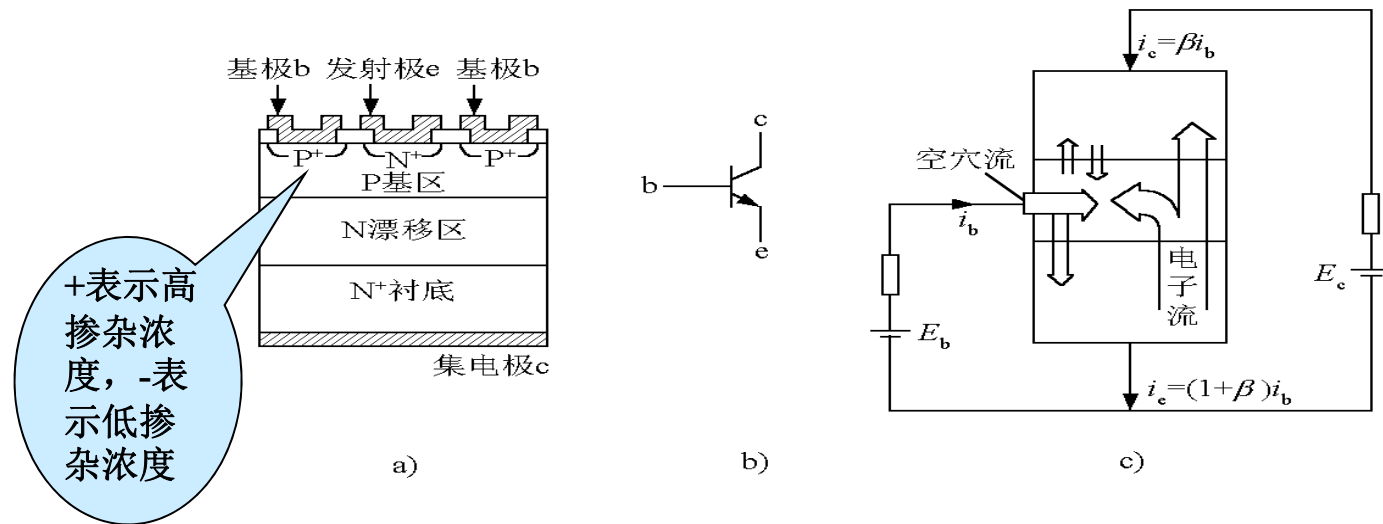


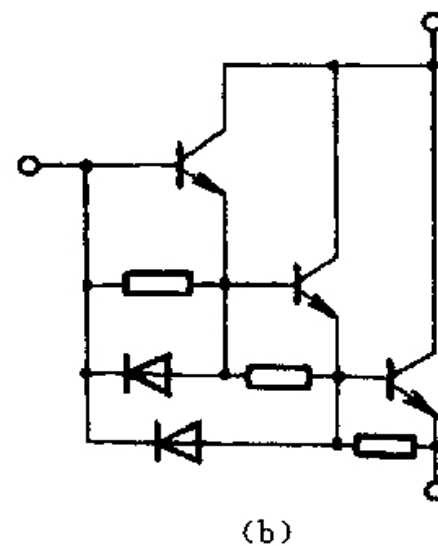
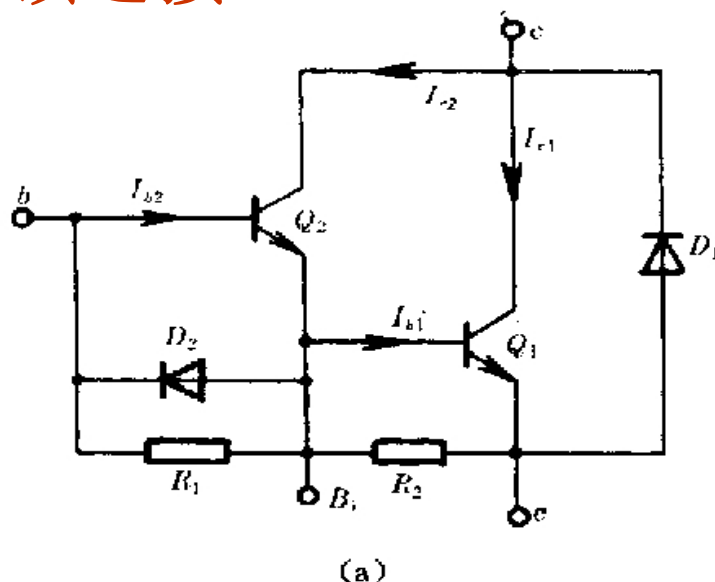
图2-16 GTR的结构、电气图形符号和内部载流子的流动
a) 内部结构断面示意图 b) 电气图形符号 c) 内部载流子的流动

◆ GTR的结构

采用至少由两个晶体管按**达林顿接法**组成的单元结构，并采用集成电路工艺将许多这种单元**并联**而成。

GTR是由**三层半导体**（分别引出集电极、基极和发射极）形成的两个**PN结**（集电结和发射结）构成，多采用**NPN**结构。

达林顿连接



达林顿管(Darlington Transistor)又称复合管。它采用复合连接方式，将二只三极管适当的连接在一起，以组成一只等效的新的三极管，极性只认前面的三极管。

等效三极管的放大倍数是是两个三极管放大倍数的乘积

■ GTR的基本特性

◆ 静态特性

✎ 在共发射极接法时的典型输出特性分为截止区、放大区和饱和区三个区域。

✎ 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，一般要经过放大区。

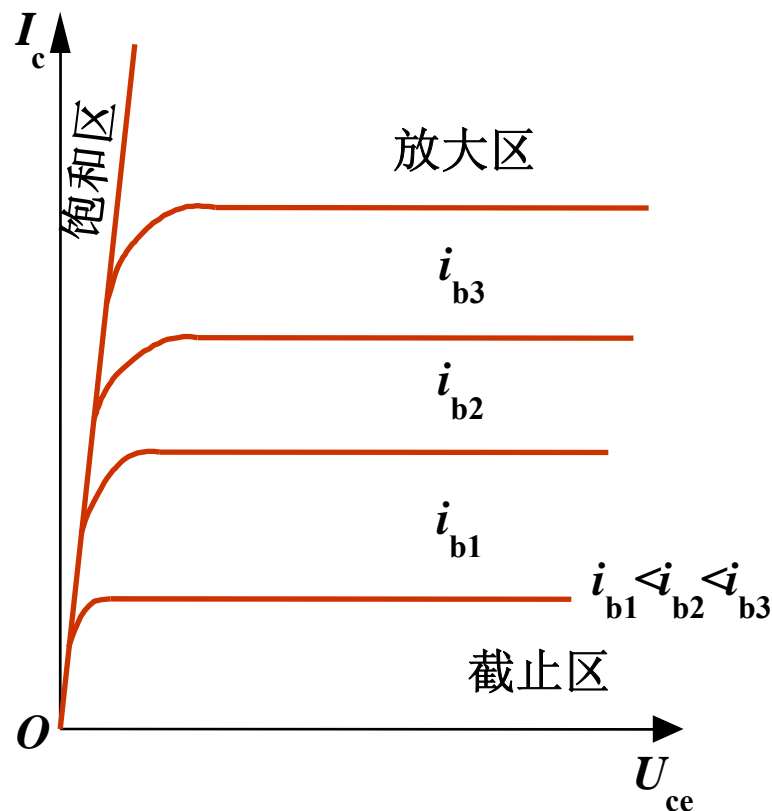


图2-17 共发射极接法时
GTR的输出特性

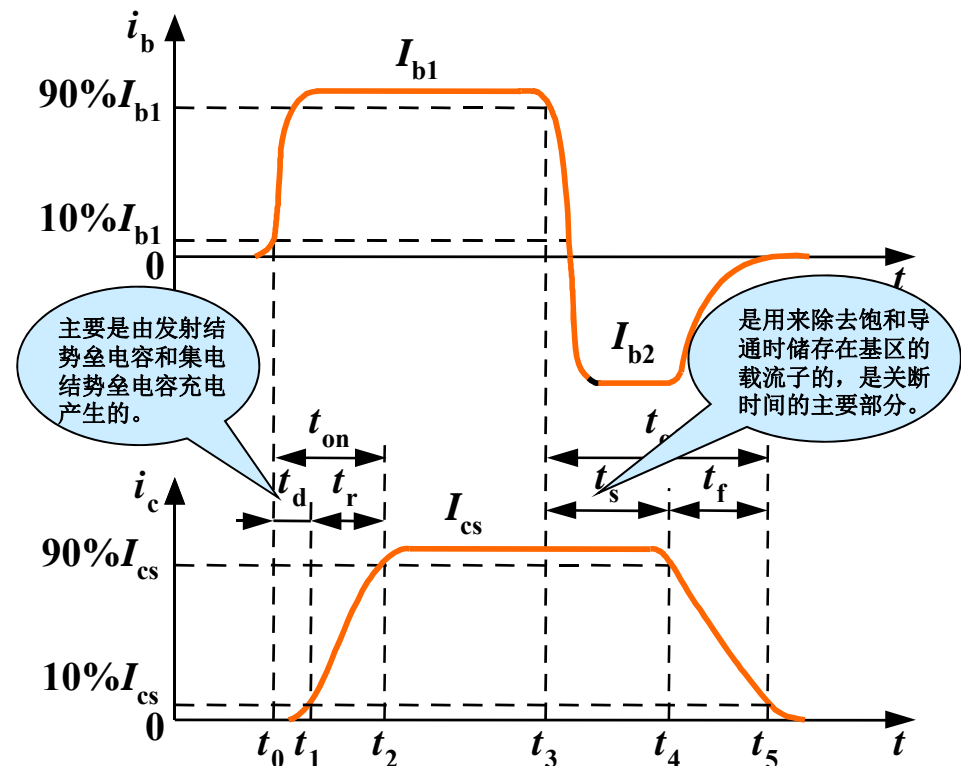
◆ 动态特性

☞ 开通过程

- √ 需要经过延迟时间 t_d 和上升时间 t_r ，二者之和为开通时间 t_{on} 。
- √ 增大基极驱动电流 i_b 的幅值并增大 di_b/dt ，可以缩短延迟时间，同时也可以缩短上升时间，从而加快开通过程。

☞ 关断过程

- √ 需要经过储存时间 t_s 和下降时间 t_f ，二者之和为关断时间 t_{off} 。
- √ 减小导通时的饱和深度以减小储存的载流子，或者增大基极抽取负电流 I_{b2} 的幅值和负偏压，可以缩短储存时间，从而加快关断速度。
- ☞ GTR的开关时间在几微秒以内，比晶闸管和GTO都短很多。



■ GTR的二次击穿现象与安全工作区

◆ 当GTR的集电极电压升高至击穿电压时，集电极电流迅速增大，这种首先出现的击穿是**雪崩击穿**，被称为一次击穿。

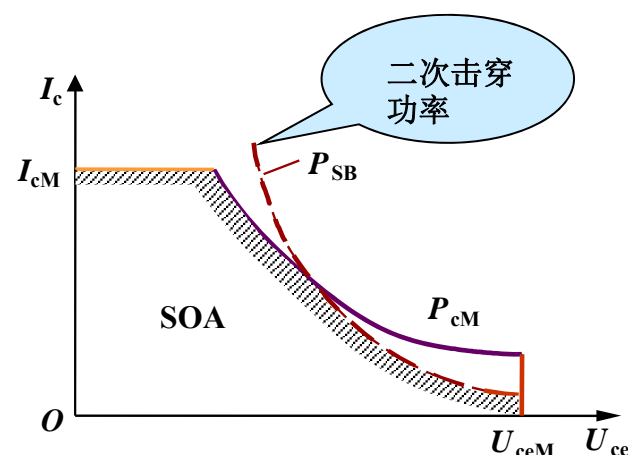
◆ 发现一次击穿发生时如不有效地限制电流， I_c 增大到某个临界点时会突然急剧上升，同时伴随着电压的陡然下降，这种现象称为二次击穿。

◆ 出现一次击穿后，GTR一般不会损坏，二次击穿常常立即导致器件的永久损坏，或者工作特性明显衰变，因而对GTR危害极大。

◆ 安全工作区（Safe Operating Area——SOA）

☞ 将不同基极电流下二次击穿的临界点连接起来，就构成了二次击穿临界线。

☞ GTR工作时不仅不能超过最高电压 U_{ceM} ，集电极最大电流 I_{cM} 和最大耗散功率 P_{cM} ，也不能超过**二次击穿临界线**。



1. 静特性 电流控制型开关器件

输入和输出特性

饱和, 截止, 放大

饱和深度影响: 总导通损耗, 关断速度

2. 开关特性

电容效应造成:

开通时间: $t_{ON} = \text{延迟时间 } t_d + \text{上升时间 } t_r$ 关断时间: $t_{OF} = \text{存储时间 } t_s + \text{下降时间 } t_f$

3. 参数

电流放大倍数和饱和压降(特性)

额定值(极限值): 电压定额 BU_{ceo} , BU_{ebo} ; 最大允许电流 I_{CM}

安全工作区: 电流, 功耗, 电压, 二次击穿

■ 分为**结型**和**绝缘栅型**，但通常主要指绝缘栅型中的MOS型（Metal Oxide Semiconductor FET），简称电力MOSFET（Power MOSFET）。

■ 电力MOSFET是用**栅极**电压来控制**漏极**电流的，它的特点有：

- ◆ 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。

■ 电力MOSFET的结构和工作原理

◆ 电力MOSFET的种类

☞ 按导电沟道可分为P沟道和N沟道。

☞ 当栅极电压为零时漏源极之间就存在导电沟道的称为耗尽型。

☞ 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的称为增强型。

☞ 在电力MOSFET中，主要是N沟道增强型。

◆电力MOSFET的结构

是单极型晶体管。

结构上与小功率MOS管有较大区别，小功率MOS管是横向导电器件，而目前电力MOSFET大都采用了垂直导电结构，所以又称为VMOSFET（Vertical MOSFET），这大大提高了MOSFET器件的耐压和耐电流能力。

按垂直导电结构的差异，分为利用V型槽实现垂直导电的VVMOSFET（Vertical V-groove MOSFET）和具有垂直导电双扩散MOS结构的DMOSFET（Vertical Double-diffused MOSFET）。

电力MOSFET也是多元集成结构。

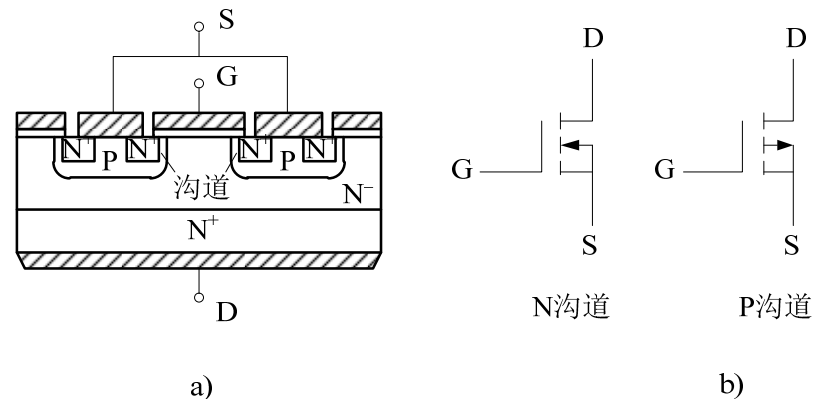


图2-20 电力MOSFET的结构和电气图形符号

- a) 内部结构断面示意图
b) 电气图形符号

■ 电力MOSFET的基本特性

◆ 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。

✓ 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MOSFET的跨导 G_{fs} ，即

$$G_{fs} = \frac{dI_D}{dU_{GS}} \quad (2-11)$$

✓ 是电压控制型器件，其输入阻抗极高，输入电流非常小。

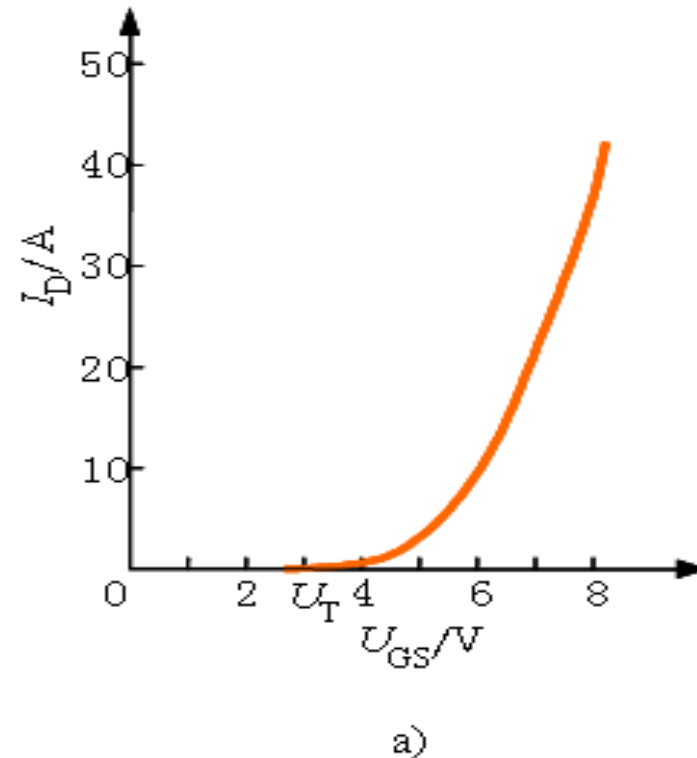


图2-21 电力MOSFET的
转移特性和输出特性
a) 转移特性

1.4.3 电力场效应晶体管

输出特性

✓是MOSFET的漏极伏安特性。

✓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（对应于GTR的饱和区）三个区域，饱和是指漏源电压增加时漏极电流不再增加，非饱和是指漏源电压增加时漏极电流相应增加。

✓工作在开关状态，即在截止区和非饱和区之间来回转换。

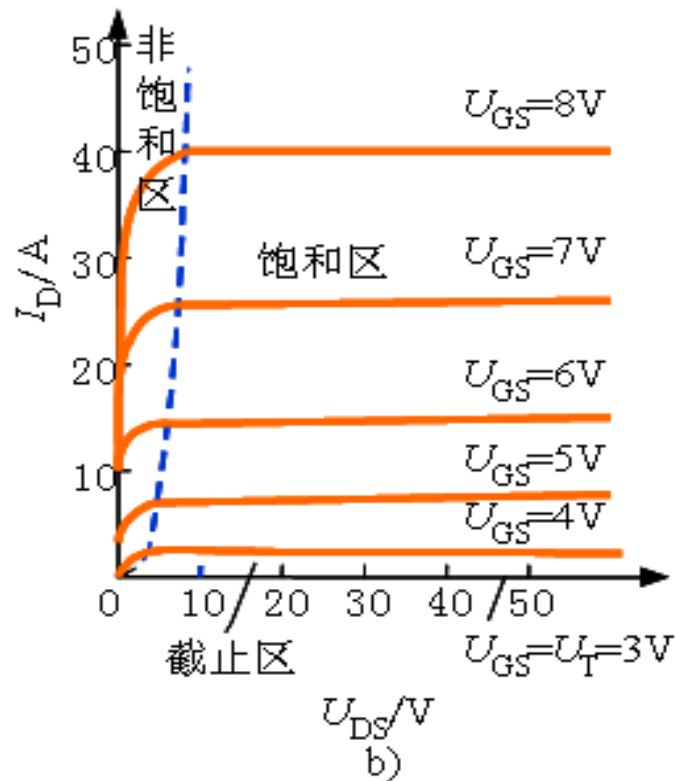
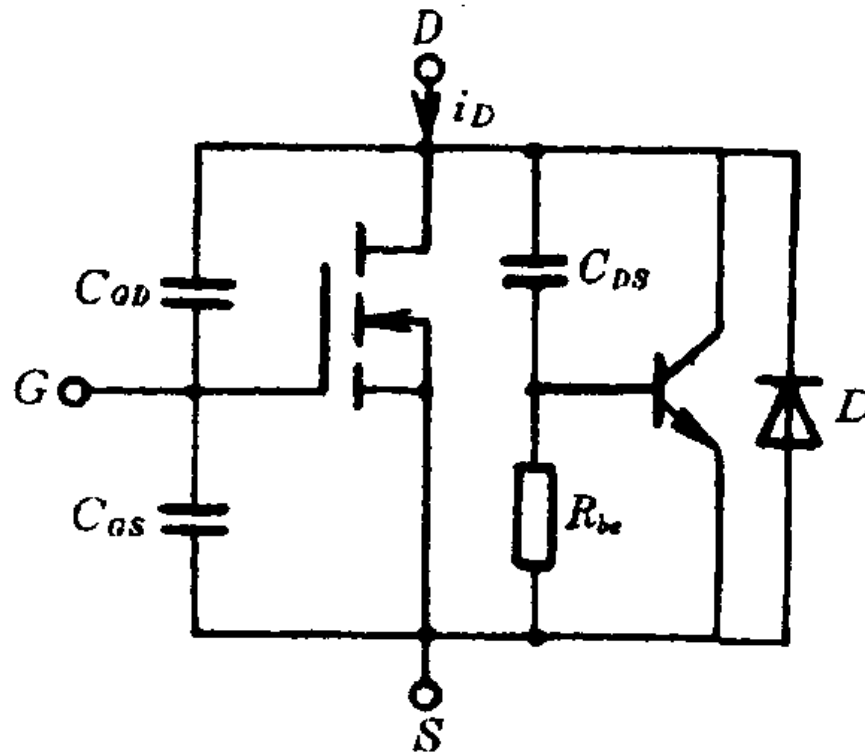


图2-21 电力MOSFET
的转移特性和输出特性
b) 输出特性

1.4.3 电力场效应晶体管

- 本身结构所致，漏极和源极之间形成了一个与MOSFET反向并联的寄生二极管。
- 通态电阻具有正温度系数，对器件并联时的均流有利。

米勒电容和 米勒效应



◆ 动态特性

☞ 开通过程

√ 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}

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

☞ 关断过程

√ 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 $t_{off} = t_{d(off)} + t_{rv} + t_{fi}$

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。

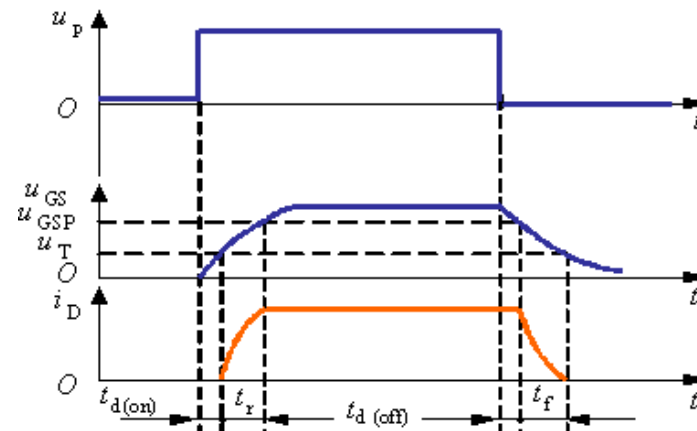
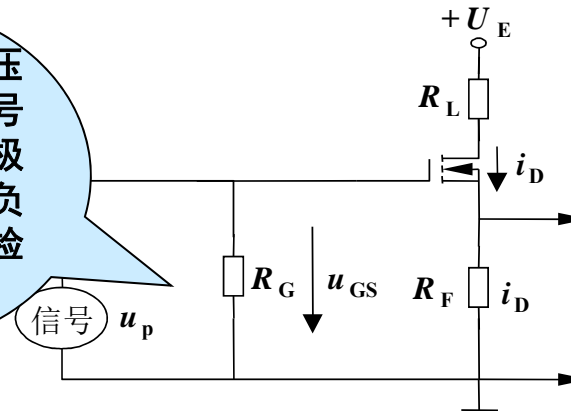


图2-22 电力MOSFET的开关过程
a) 测试电路 b) 开关过程波形

● MOSFET的开关速度

- ✎ MOSFET的开关速度和其输入电容的充放电有很大关系，可以降低栅极驱动电路的内阻 R_s ，从而减小栅极回路的充放电时间常数，加快开关速度。
- ✎ 不存在少子储存效应，因而其关断过程是非常迅速的。
- ✎ 开关时间在10~100ns之间，其工作频率可达100kHz以上，是主要电力电子器件中最高的。
- ✎ 静态时几乎不需要输入电流。在开关过程中需要对输入电容充放电，仍需要一定的驱动功率。
- ✎ 开关频率越高，所需要的驱动功率越大。

■ 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}
 - ☞ 栅源之间的绝缘层很薄， $|U_{GS}| > 20V$ 将导致绝缘层击穿。
- ◆ 极间电容
 - ☞ C_{GS} 、 C_{GD} 和 C_{DS} 。
- ◆ 漏源间的耐压、漏极最大允许电流和最大耗散功率决定了电力MOSFET的安全工作区。

1. 静特性:电压控制型开关器件

输出特性和转移特性

体二极管

2. 开关特性:寄生电容引起

开通时间: $t_{ON} = \text{开通延迟} t_{d(on)} + \text{上升} t_r$

关断时间: $t_{OF} = \text{关断延迟} t_{s(off)} + \text{下降} t_f$

du/dt

3. 参数

静态: 通态电阻 R_{DS} (正温度系数), 开启电压 U_T

动态: t_{ON} , t_{OF} , du/dt , Q_g , 米勒效应

极限: 漏源击穿电压; 栅源击穿电压

最大允许漏极电流

最大允许功耗

安全工作区: 电流, 电压, 功耗

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。
 - ✦ 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，以期再取代GTO的地位。

IGBT的结构和工作原理

IGBT的结构

是三端器件，具有栅极G、集电极C和发射极E。

由N沟道VDMOSFET与双极型晶体管组合而成的IGBT，比VDMOSFET多一层P⁺注入区，实现对漂移区电导率进行调制，使得IGBT具有很强的通流能力。

简化等效电路表明，IGBT是用GTR与MOSFET组成的达林顿结构，相当于一个由MOSFET驱动的厚基区PNP晶体管。

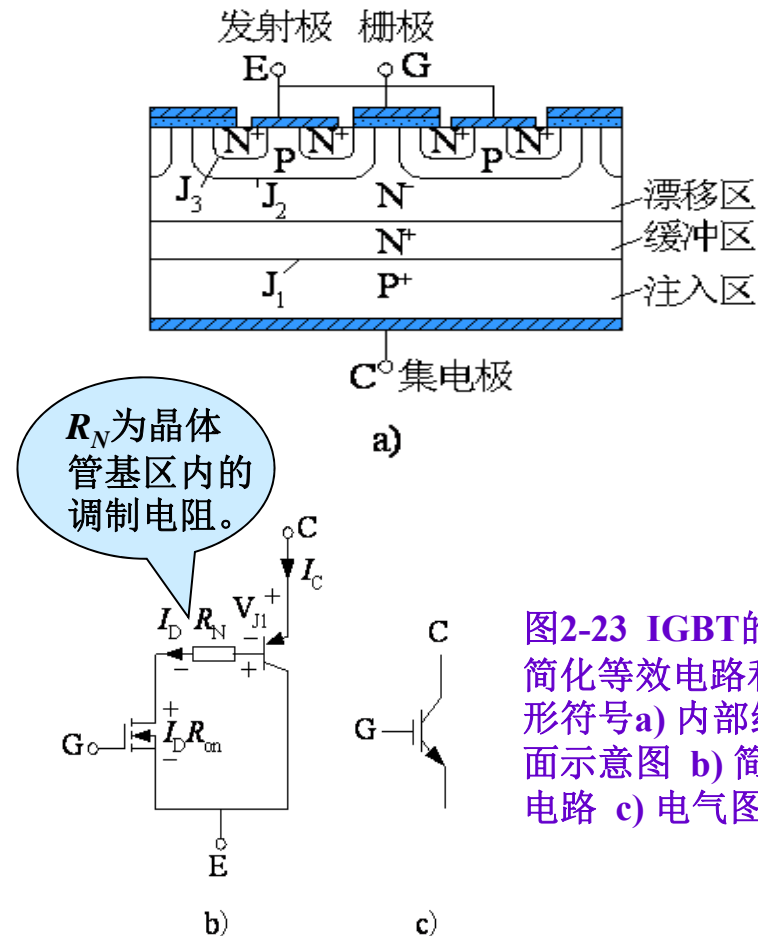


图2-23 IGBT的结构、简化等效电路和电气图形符号 a) 内部结构断面示意图 b) 简化等效电路 c) 电气图形符号

◆ 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。

✎ 其开通和关断是由栅极和发射极间的电压 U_{GE} 决定的。

✓ 当 U_{GE} 为正且大于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时，MOSFET内形成沟道，并为晶体管提供基极电流进而使IGBT导通。

✓ 当栅极与发射极间施加反向电压或不加信号时，MOSFET内的沟道消失，晶体管的基极电流被切断，使得IGBT关断。

✎ 电导调制效应使得电阻 R_N 减小，这样高耐压的IGBT也具有很小的通态压降。

■ IGBT的基本特性

◆ 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 $U_{GE(th)}$ 是 IGBT 能实现电导调制而导通的最低栅射电压，随温度升高而略有下降。

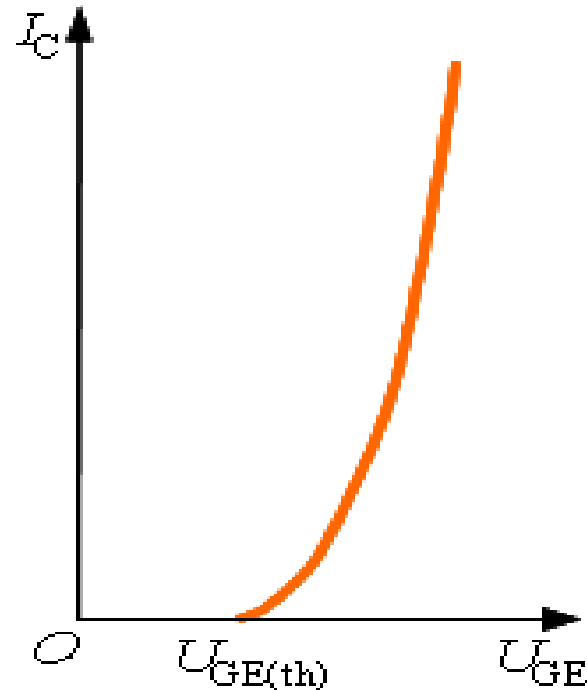


图2-24 IGBT的转移特性和输出特性
a) 转移特性

1.4.4 绝缘栅双极晶体管

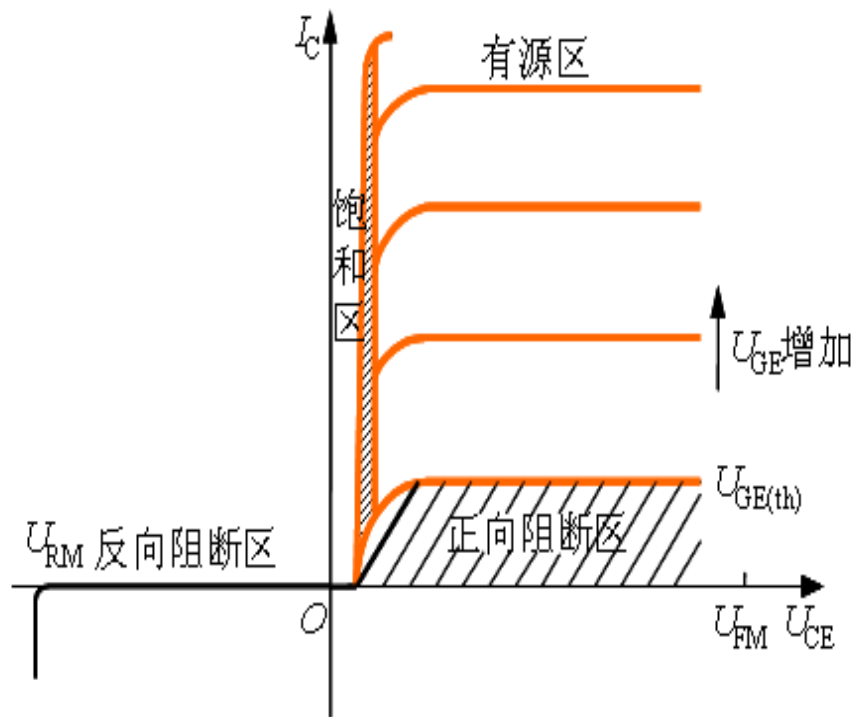


图2-24 IGBT的转移特性和输出特性
b) 输出特性

✎ 输出特性（伏安特性）
✓ 描述的是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。

✓ 分为三个区域：正向阻断区、有源区和饱和区

✓ 当 $U_{CE} < 0$ 时，IGBT 为反向阻断工作状态。

✓ 在电力电子电路中，IGBT 工作在开关状态，因而是在正向阻断区和饱和区之间来回转换。

1.4.4 绝缘栅双极晶体管

◆ 动态特性

☞ 开通过程

✓ 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}

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

✓ t_{fv} 分为 t_{fv1} 和 t_{fv2} 两段。

☞ 关断过程

✓ 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 $t_{off} = t_{d(off)} + t_{rv} + t_{fi}$

✓ t_{fi} 分为 t_{fi1} 和 t_{fi2}

☞ 引入了少子储存现象，因而

IGBT的开关速度要低于电力

MOSFET。

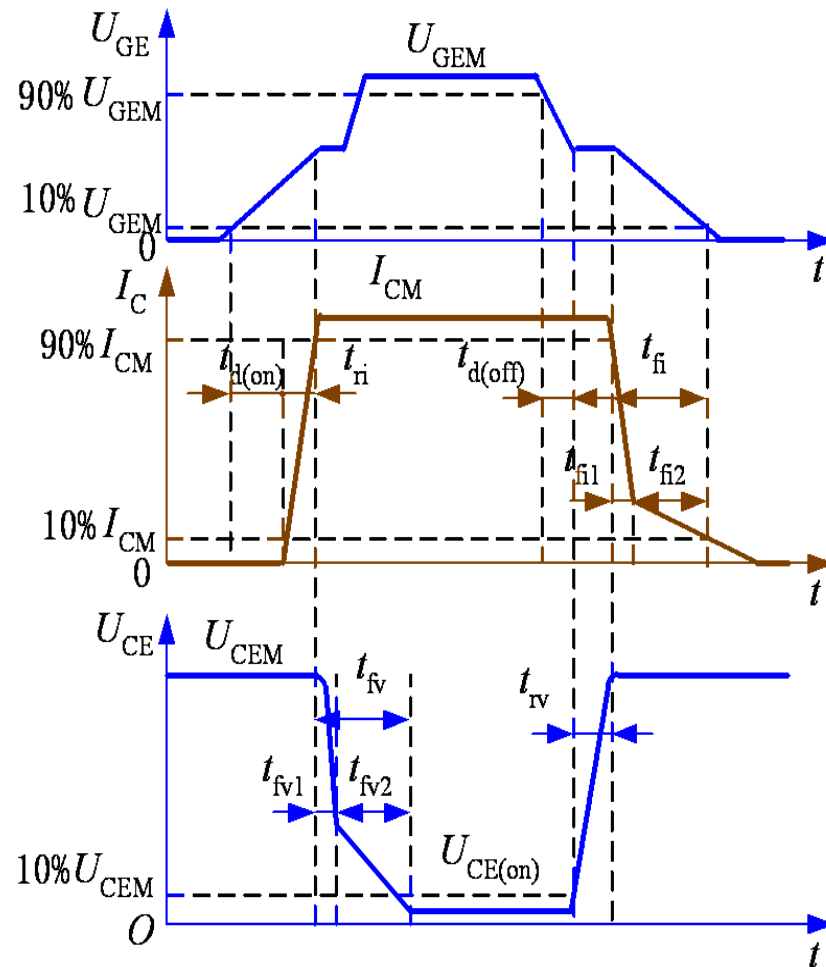


图2-25 IGBT的开关过程

■ IGBT的主要参数

◆ 前面提到的各参数。

◆ 最大集射极间电压 U_{CES}

☞ 由器件内部的PNP晶体管所能承受的击穿电压所确定的。

◆ 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}

☞ 在正常工作温度下允许的最大耗散功率。

◆ IGBT的特性和参数特点可以总结如下：

- ☞ 开关速度高，开关损耗小。
- ☞ 在相同电压和电流定额的情况下，IGBT的安全工作区比GTR大，而且具有耐脉冲电流冲击的能力。
- ☞ 通态压降比VDMOSFET低，特别是在电流较大的区域。
- ☞ 输入阻抗高，其输入特性与电力MOSFET类似。
- ☞ 与电力MOSFET和GTR相比，IGBT的耐压和通流能力还可以进一步提高，同时保持开关频率高的特点。

◆ IGBT的安全工作区

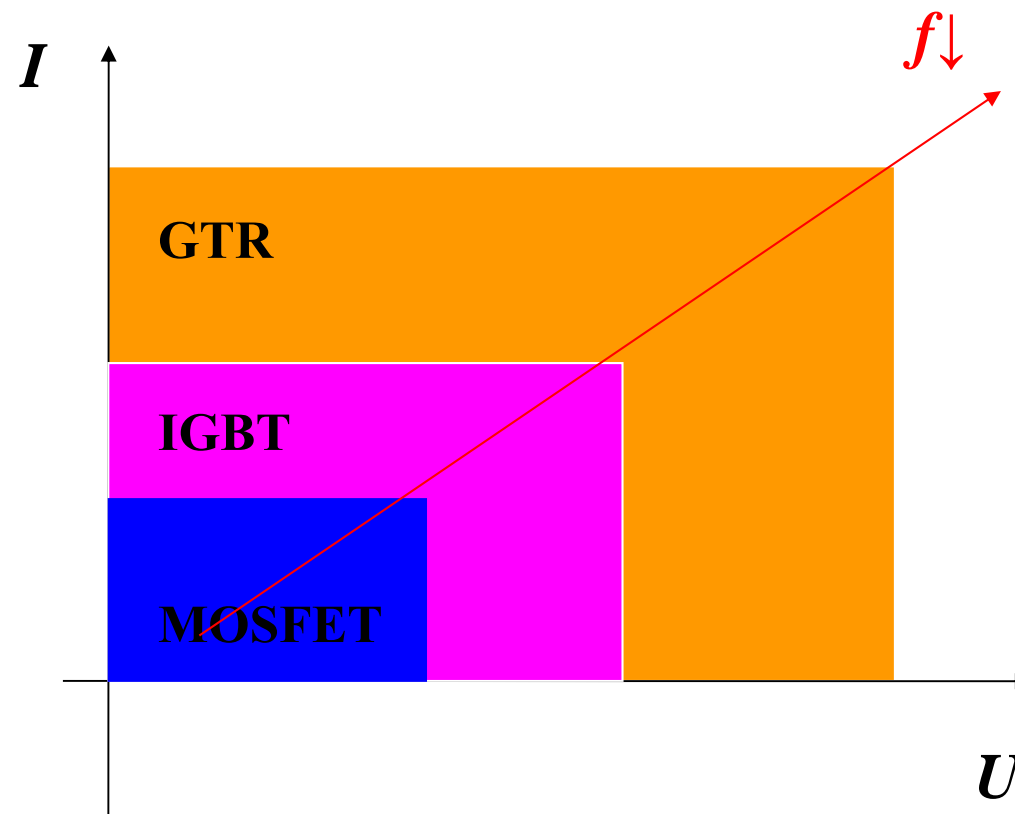
➡ **正向偏置安全工作区** (Forward Biased Safe Operating Area——FBSOA)

✓ 根据最大集电极电流、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** (Reverse Biased Safe Operating Area——RBSOA)

✓ 根据最大集电极电流、最大集射极间电压和最大允许电压上升率 dU_{CE}/dt 。

三种全控开关器件的应用特点:



1. 静特性:电压控制型开关器件
饱和压降

2. 开关特性:寄生电容引起

安全工作区，拖尾电流

■ 将各种主要电力电子器件的基本结构、工作原理、基本特性和主要参数等问题作了全面的介绍。

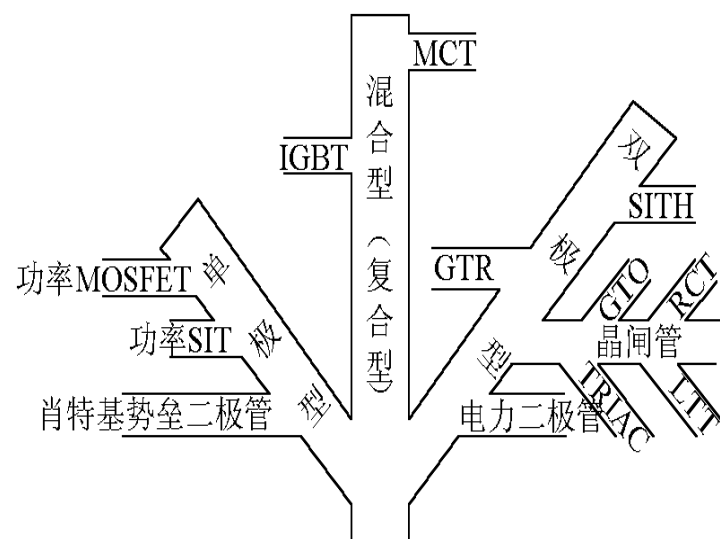
■ 电力电子器件归类

◆ 按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况

📌 **单极型**：肖特基二极管、电力MOSFET和SIT等。

📌 **双极型**：基于PN结的电力二极管、晶闸管、GTO和GTR等。

📌 **复合型**：IGBT、SITH和MCT等。



◆按驱动类型

☞电压驱动型器件

√单极型器件和复合型器件。

√共同特点是：输入阻抗高，所需驱动功率小，驱动电路简单，工作频率高。

☞电流驱动型器件

√双极型器件。

√共同特点是：具有电导调制效应，因而通态压降低，导通损耗小，但工作频率较低，所需驱动功率大，驱动电路也比较复杂。

◆按控制信号的波形

☞电平控制型器件

√电压驱动型器件和部分电流驱动型器件（如GTR）

☞脉冲触发型器件

√部分电流驱动型器件（如晶闸管和GTO）

■ 电力电子器件的现状和发展趋势

◆ 20世纪90年代中期以来，逐渐形成了小功率（10kW以下）场合以电力MOSFET为主，中、大功率场合以IGBT为主的压倒性局面，在10MVA以上或者数千伏以上的应用场合，如果不需要自关断能力，那么晶闸管仍然是目前的首选器件。

◆ 电力MOSFET和IGBT中的技术创新仍然在继续，IGBT还在不断夺取传统上属于晶闸管的应用领域。

◆ 宽禁带半导体材料由于其各方面性能都优于硅材料，因而是很有前景的电力半导体材料。

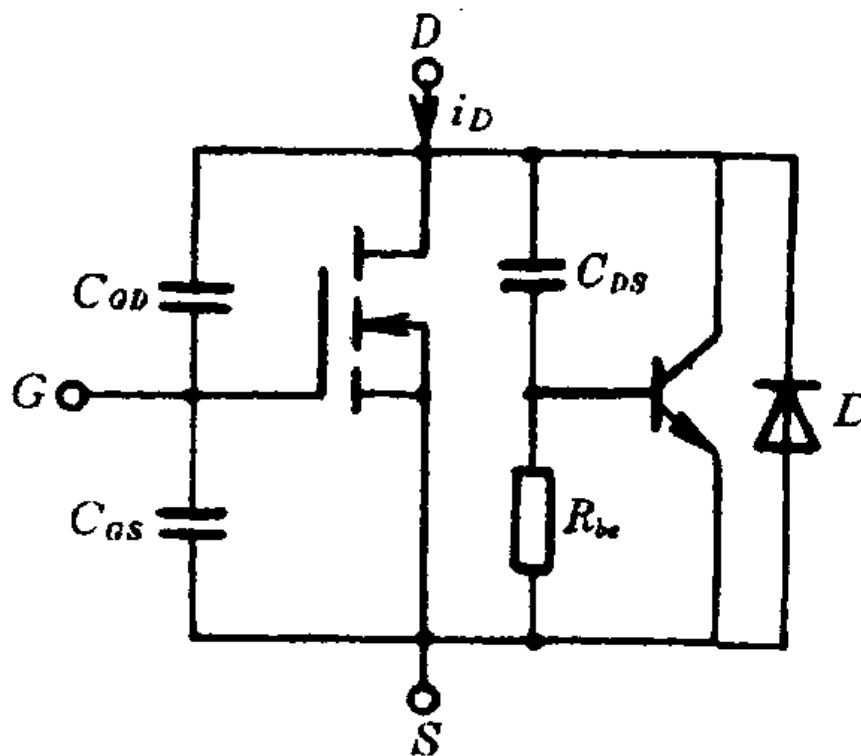
思考：

1. 二极管的种类有哪些？各自的应用场合？
2. 二极管的反向恢复带来哪些问题？
3. GTR、MOSFET和IGBT的优缺点和应用场合？

1.4.3 电力场效应晶体管

- 本身结构所致，漏极和源极之间形成了一个与MOSFET反向并联的寄生二极管。
- 通态电阻具有正温度系数，对器件并联时的均流有利。

米勒电容和米勒效应



开关特性，以开通为例

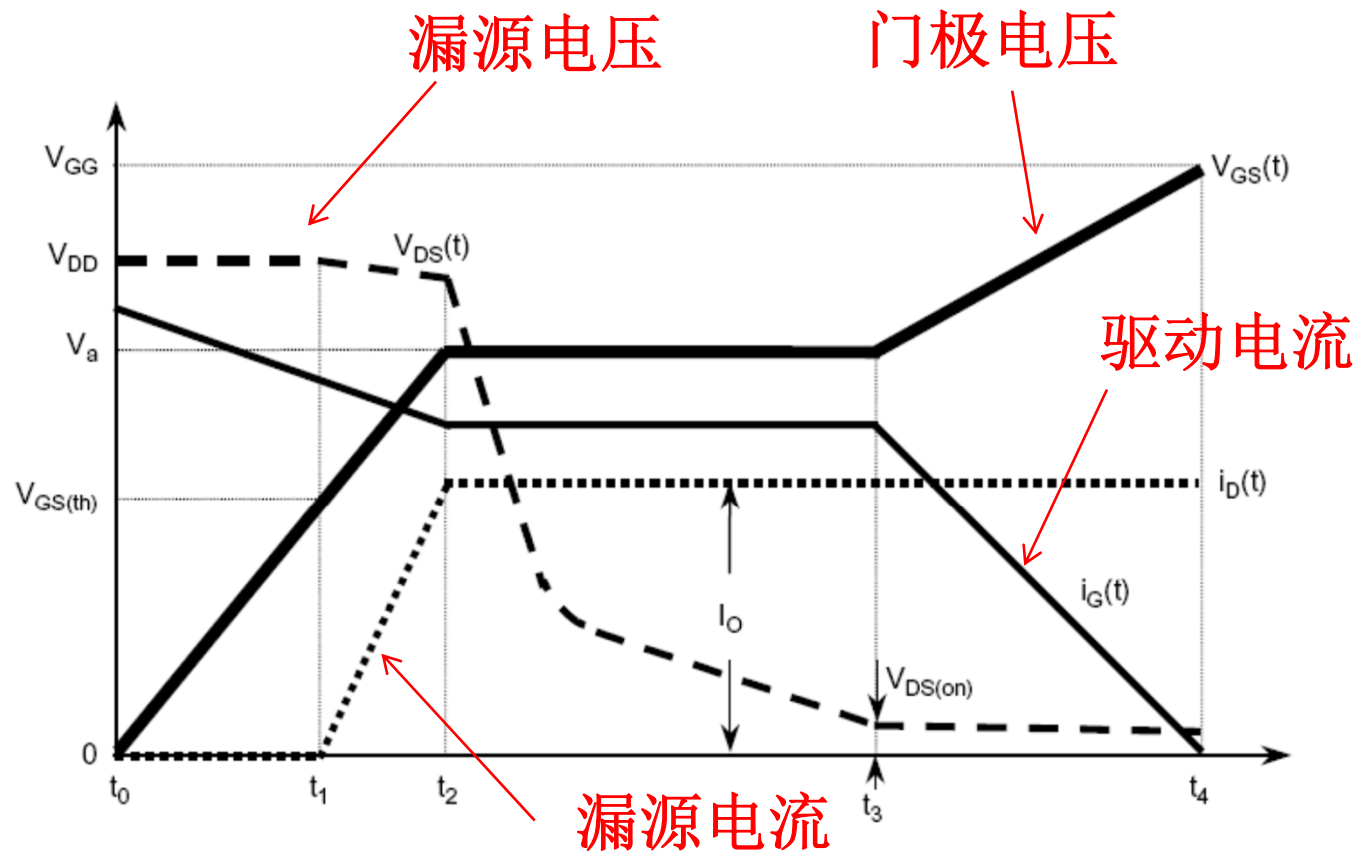
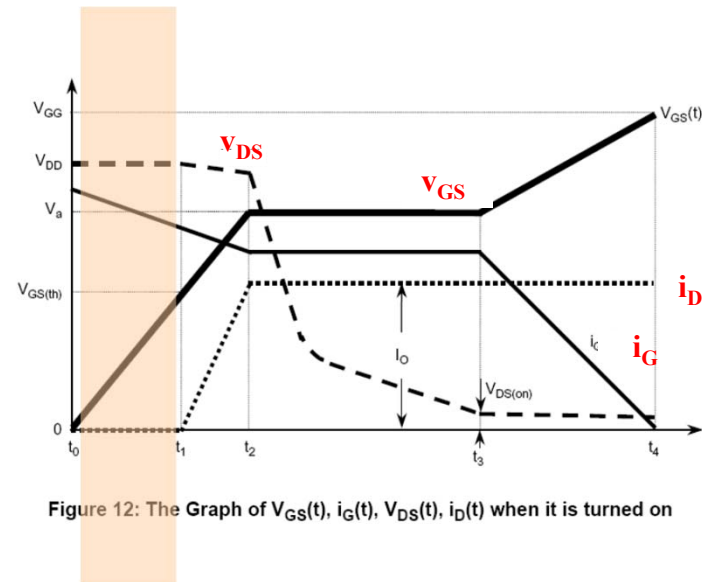
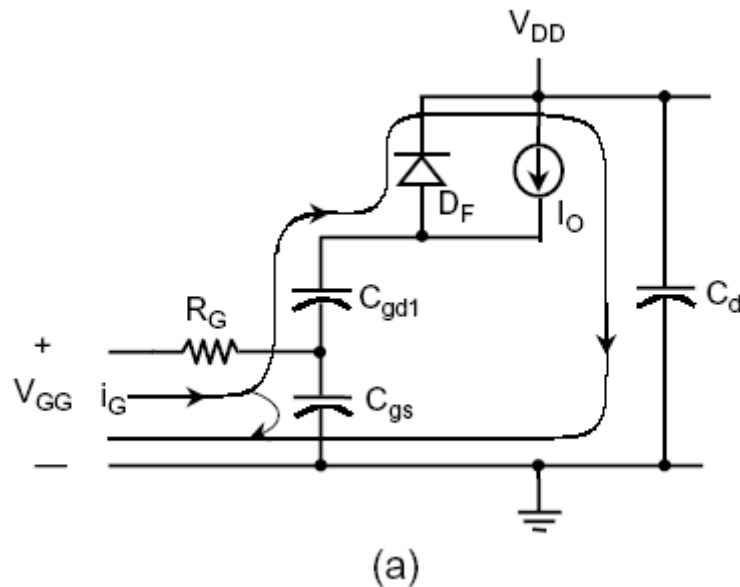


Figure 12: The Graph of $V_{GS}(t)$, $i_G(t)$, $V_{DS}(t)$, $i_D(t)$ when it is turned on

1.4.3 电力场效应晶体管

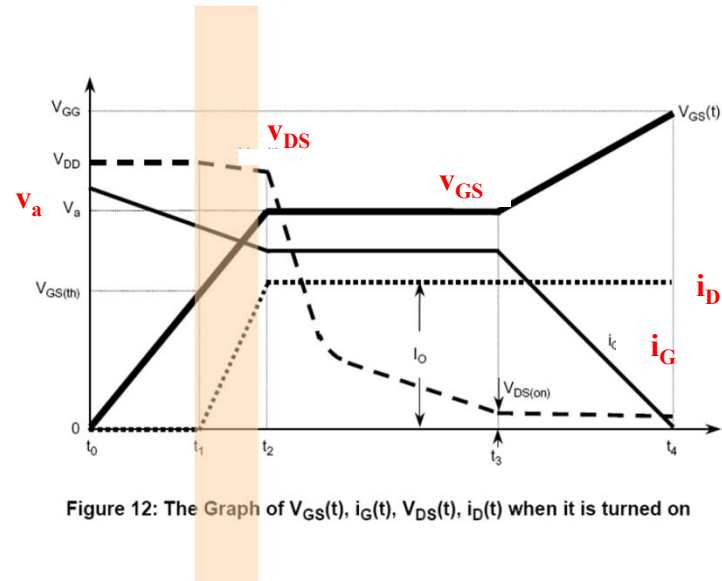
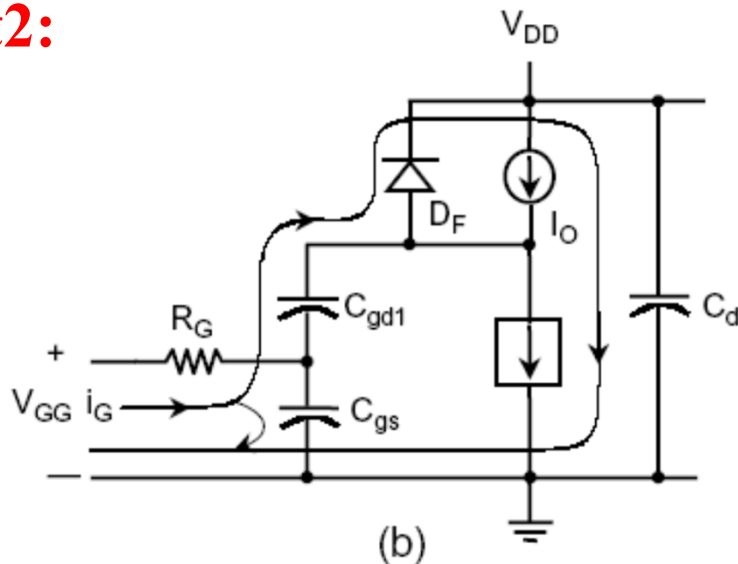
$t_0 \sim t_1$:



t_0 时刻，驱动电流 i_G 同时给电容 C_{gs} 和 C_{gd} 充电，门极电压 V_{GS} 由0增加至阈值电压 $V_{GS(th)}$ 。从图形上看，门极电压似乎是线性增加的，但实际上是按照指数曲线，时间常数为 $\tau_1 = R_G(C_{gs} + C_{gd1})$ 。 t_0 到 t_1 时间内，漏源电压 V_{DS} 仍然等于 V_{DD} ，漏源电流 i_D 等于零。MOSFET在 t_1 时刻前仍然处于关断状态。

1.4.3 电力场效应晶体管

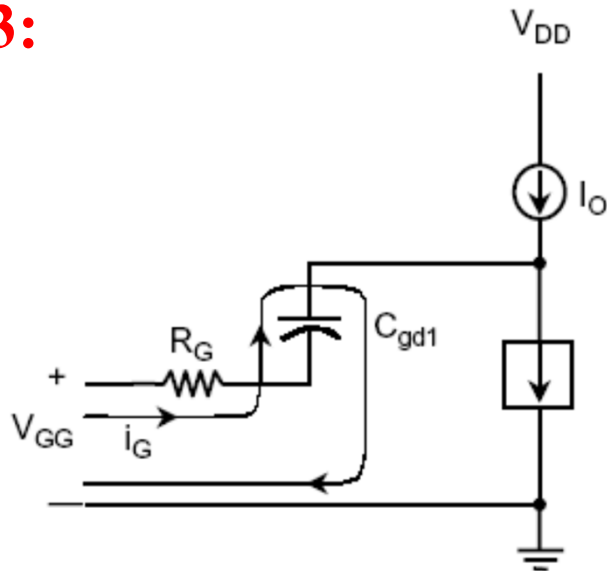
$t_1 \sim t_2$:



门极电压 V_{GS} 按照指数曲线超过门槛电压 $V_{GS(th)}$ 并继续增加，在 t_2 时刻达到电压 V_a 。漏源电流 i_D 在 t_1 时刻开始增加，并在 t_2 时刻达到满载电流 (I_O)，此时漏源电压 V_{DS} 仍然等于 V_{DD} 。但是，从图中看出漏源电压有一些下降并低于 V_{DD} 。这是由线路中寄生电感的压降引起。

1.4.3 电力场效应晶体管

$t_2 \sim t_3$:



(c)

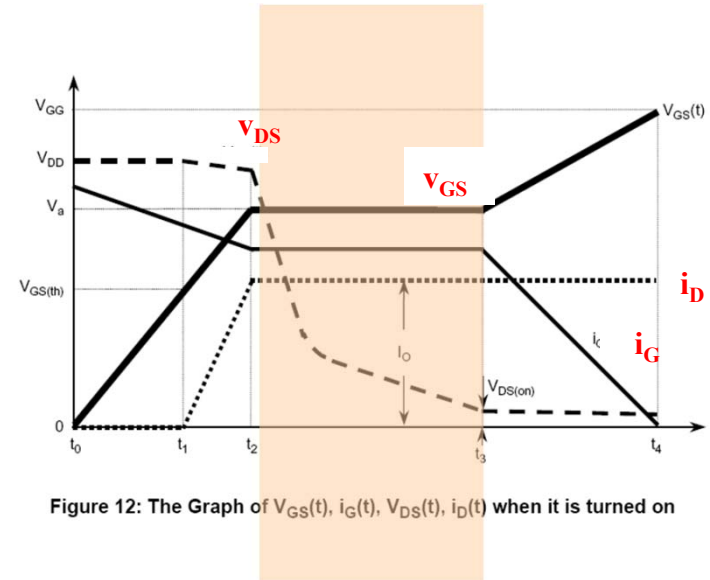


Figure 12: The Graph of $V_{GS}(t)$, $i_G(t)$, $V_{DS}(t)$, $i_D(t)$ when it is turned on

米勒效应

根据MOSFET的转移特性， t_2 到 t_3 时间内，门极电压 V_{GS} 保持为一个常数，此时漏源电流 i_D 等于满载电流(I_O)。驱动电流 i_G 流过寄生电容 C_{gd} ， C_{gd} 处于放电状态。此时，驱动电流满足以下关系式， V_a 表示米勒效应时对应的门极电压。

$$i_G = \frac{V_{GG} - V_a}{R_G}$$

1.4.3 电力场效应晶体管

$t_3 \sim t_4$:

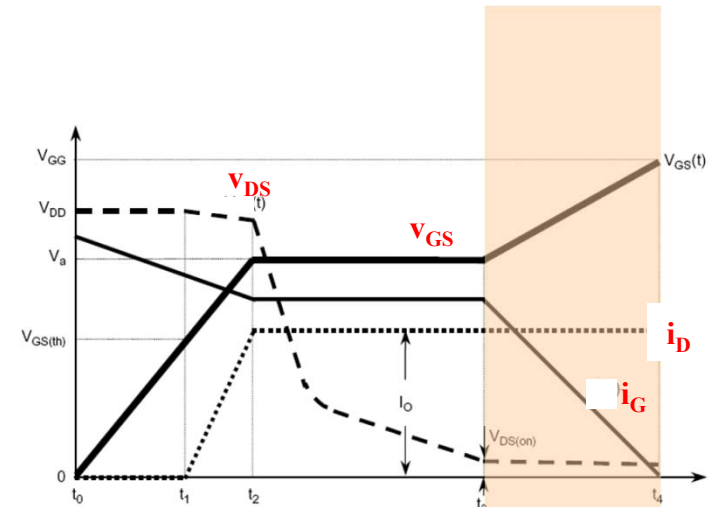
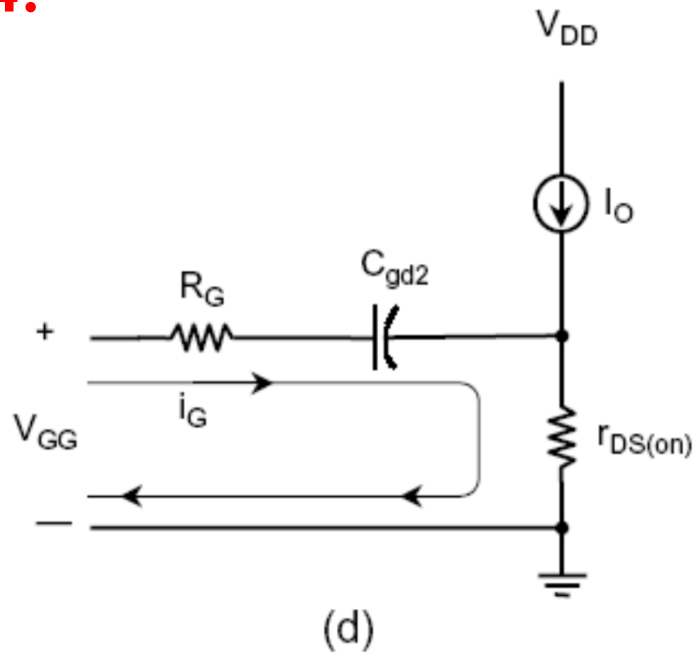


Figure 12: The Graph of $V_{GS}(t)$, $i_G(t)$, $V_{DS}(t)$, $i_D(t)$ when it is turned on

此时，MOSFET工作在电阻区，门极电压 V_{GS} 上升至驱动电压 V_{GG} 。