

第四讲

全控型器件及其他新型

电力电子器件

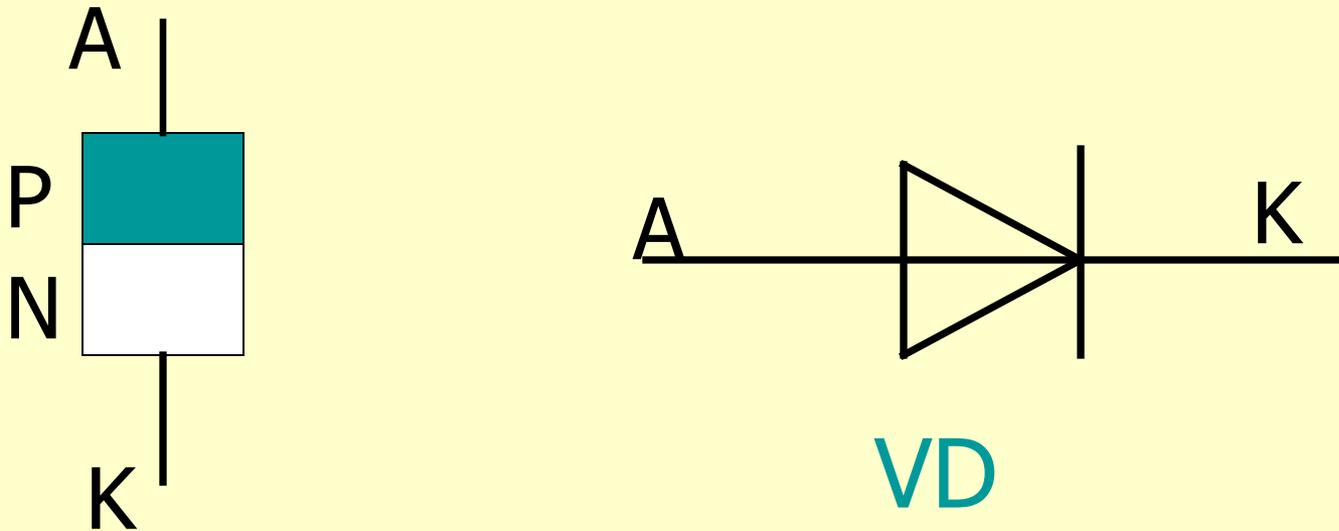
教师：孔祥新

地点：JC202

曲阜师范大学 电气信息与自动化学院

回顾 ---- 整流器件的应用

功率二极管的基本特性：



具有单向导电性

功率二极管的类型

- 整流二极管：

通态正向压降很低，反向阻断电压和工作电流可以高达几千伏和几千安，但反向恢复时间较长。多用于开关频率不高的场合，一般在 1KHz 以下。

- 快速恢复二极管：

恢复时间短，尤其是反向恢复时间短，一般在 5 微秒以内，多用于与可控开关配合的高频电路中。

- 肖特基二极管

是以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管，其反向恢复的时间更短。适用于较低输出电压和要求较低正向管压降的换流电路中。

二极管的应用

- 续流
- 限幅
- 钳位
- 稳压
- 整流
- 倍压整流

4.1 门极可关断晶闸管

1) GTO 的结构和工作原理

● 结构:

- ⊕ 与普通晶闸管的**相同点**: PNP 四层半导体结构, 外部引出阳极、阴极和门极。
- ⊕ 和普通晶闸管的**不同点**: GTO 是一种多元的功率集成器件。

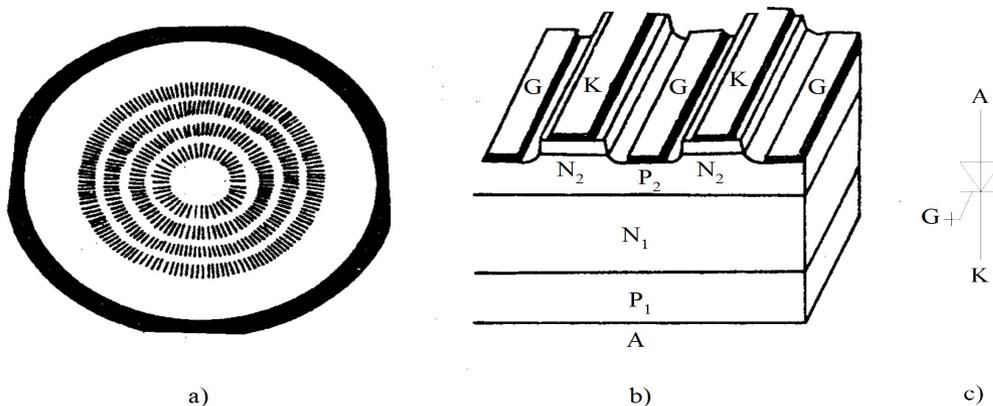


图 1-13 GTO 的内部结构和电气图形符号

a) 各单元的阴极、门极间隔排列的图形 b) 并联单元结构断面示意图 c) 电气图形符号

4.1 门极可关断晶闸管

工作原理:

- 与普通晶闸管一样，可以用图 1-7 所示的双晶体管模型来分析。

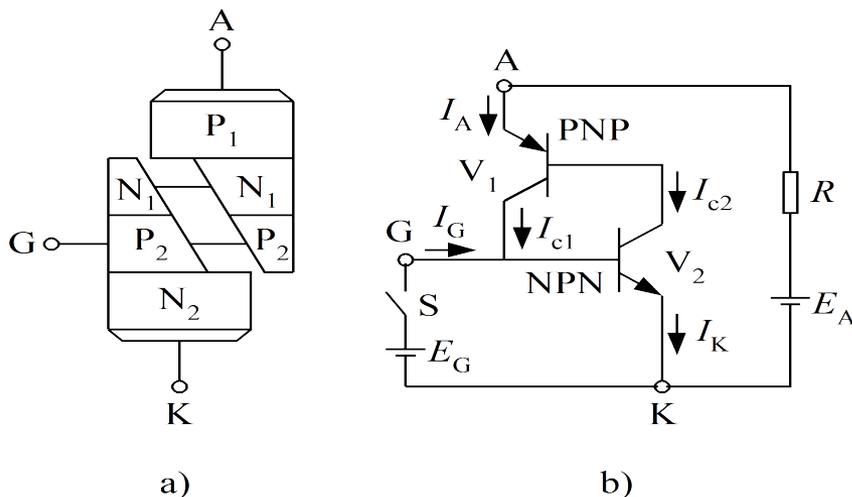


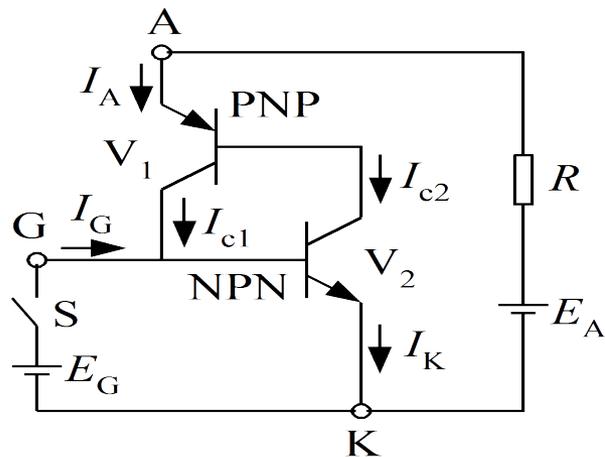
图 1-7 晶闸管的双晶体管模型及其工作原理

- 由 P₁N₁P₂ 和 N₁P₂N₂ 构成的两个晶体管 V₁、V₂ 分别具有共基极电流增益 α_1 和 α_2 。
- $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 是器件临界导通的条件。

4.1 门极可关断晶闸管

● GTO 能够通过门极关断的原因是其与普通晶闸管有如下区别:

- ✦ 设计 α_2 较大, 使晶体管 V_2 控制灵敏, 易于 GTO。
- ✦ 导通时 $\alpha_1 + \alpha_2$ 更接近 1, 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, 使得 P_2 基区横向电阻很小, 能从门极抽出较大电流。



b)

图 1-7 晶闸管的工作原理

4.1 门极可关断晶闸管

- 由上述分析我们可以得到以下**结论**：
 - ✦ GTO 导通过程与普通晶闸管一样，只是导通时饱和程度较浅。
 - ✦ GTO 关断过程中有强烈正反馈使器件退出饱和而关断。
 - ✦ 多元集成结构还使 GTO 比普通晶闸管开通过程快，承受 di/dt 能力强。

4.1 门极可关断晶闸管

2) GTO 的动态特性

- **开通过程**：与普通晶闸管相同
- **关断过程**：与普通晶闸管有所不同
 - ⊕ **储存时间 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。

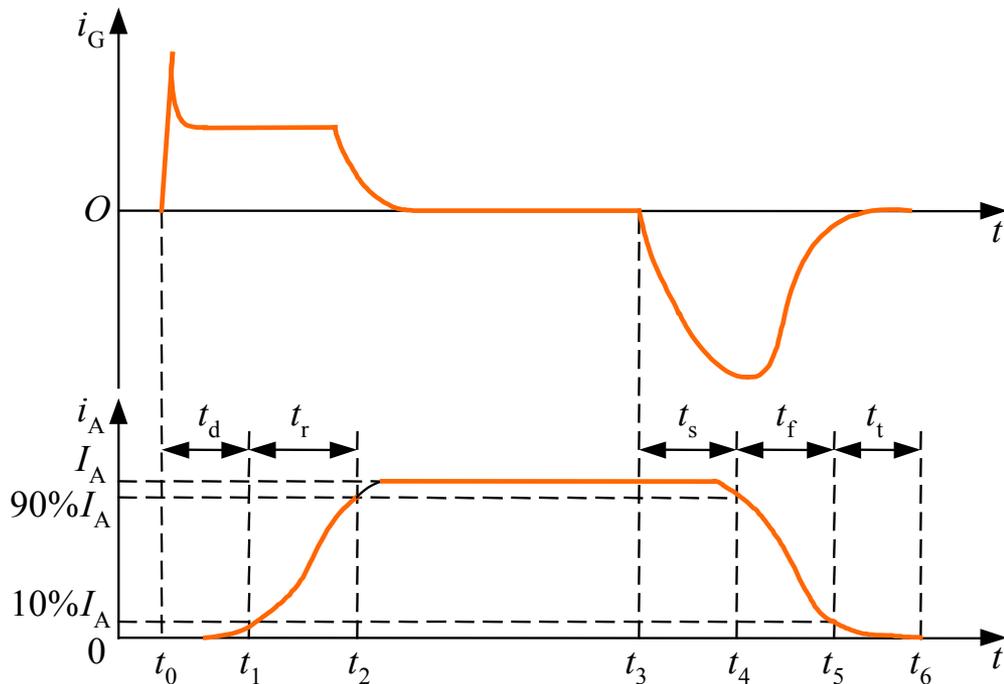


图 1-14 GTO 的开通和关断过程电流波形

4.1 门极可关断晶闸管

3) GTO 的主要参数

许多参数和普通晶闸管相应的参数意义相同，以下只介绍意义不同的参数。

(1) 开通时间 t_{on}

—— 延迟时间与上升时间之和。延迟时间一般约 $1\sim 2\mu\text{s}$ ，上升时间则随通态阳极电流的增大而增大

(2) 关断时间 t_{off}

—— 一般指储存时间和下降时间之和，不包括尾部时间。下降时间一般小于 $2\mu\text{s}$ 。

● 不少 GTO 都制造成逆导型，类似于逆导晶闸管，需承受反压时，应和电力二极管串联。

4.1 门极可关断晶闸管

(3) 最大可关断阳极电流 I_{ATO}

——GTO 额定电流。

(4) 电流关断增益 β_{off}

——最大可关断阳极电流与门极负脉冲电流最大值 I_{GM} 之比称为电流关断增益。

$$\beta_{off} = \frac{I_{ATO}}{I_{GM}} \quad (1-8)$$

β_{off} 一般很小，只有 5 左右，这是 GTO 的一个主要缺点。1000A 的 GTO 关断时门极负脉冲电流峰值要 200A 。

4.2 电力晶体管

术语用法：

- ❖ 电力晶体管（ Giant Transistor——GTR，直译为巨型晶体管）。
- ❖ 耐高电压、大电流的双极结型晶体管（ Bipolar Junction Transistor——BJT），英文有时候也称为 Power BJT。
- ❖ DATASHEET 1 2

应用

- ❖ 20 世纪 80 年代以来，在中、小功率范围内取代晶闸管，但目前又大多被 IGBT 和电力 MOSFET 取代。

4.2 电力晶体管

1) GTR 的结构和工作原理

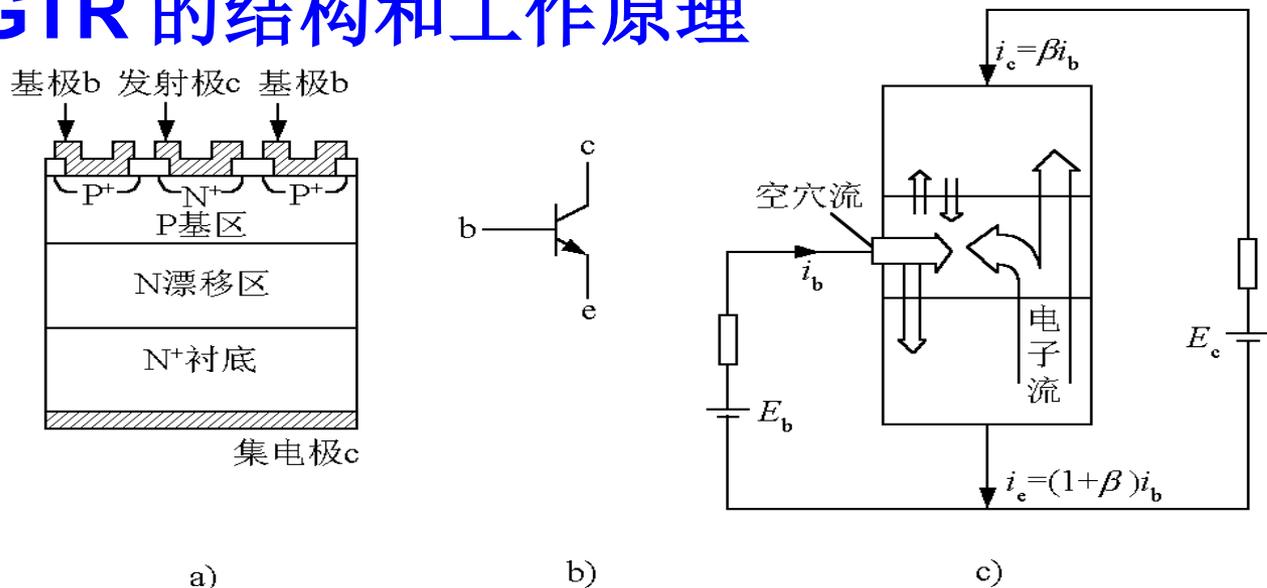


图 1-15 GTR 的结构、电气图形符号和内部载流子的流动

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

- 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。

4.2 电力晶体管

1) GTR 的结构和工作原理

- 在应用中，GTR 一般采用共发射极接法。
- 集电极电流 i_c 与基极电流 i_b 之比为

$$\beta = \frac{i_c}{i_b}$$

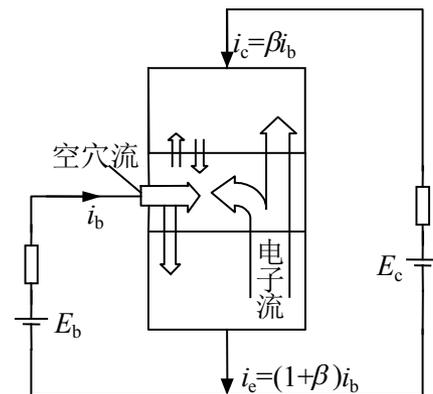
β ——GTR 的**电流放大系数**，反映了基极电流对集电极电流的控制能力。

- 当考虑到集电极和发射极间的漏电流 I_{ce0} 时， i_c 和 i_b 的关系为

$$i_c = \beta i_b + I_{ce0}$$

(1-10)

- 单管 GTR 的 β 值比小功率的晶体管小得多，通常为 10 左右，采用达林顿接法可有效增大电流增益。



c)

(1-9)

4.2 电力晶体管

2) GTR 的基本特性

(1) 静态特性

- 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。
- 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。

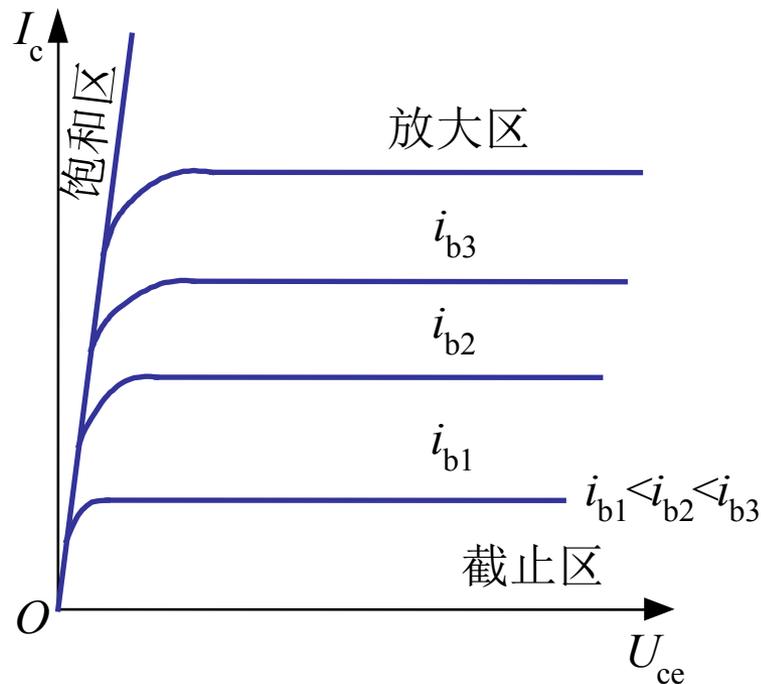


图 1-16 共发射极接法时 GTR 的输出特性

4.2 电力晶体管

(2) 动态特性

● 开通过程

⊕ 延迟时间 t_d 和上升时间 t_r
，二者之和为开通时间 t_{on}

。

⊕ 加快开通过程的办法。

● 关断过程

⊕ 储存时间 t_s 和下降时间 t_f
，二者之和为关断时间 t_{off}

。

⊕ 加快关断速度的办法。

⊕ GTR 的开关时间在几微秒以内，比晶闸管和 GTO 都

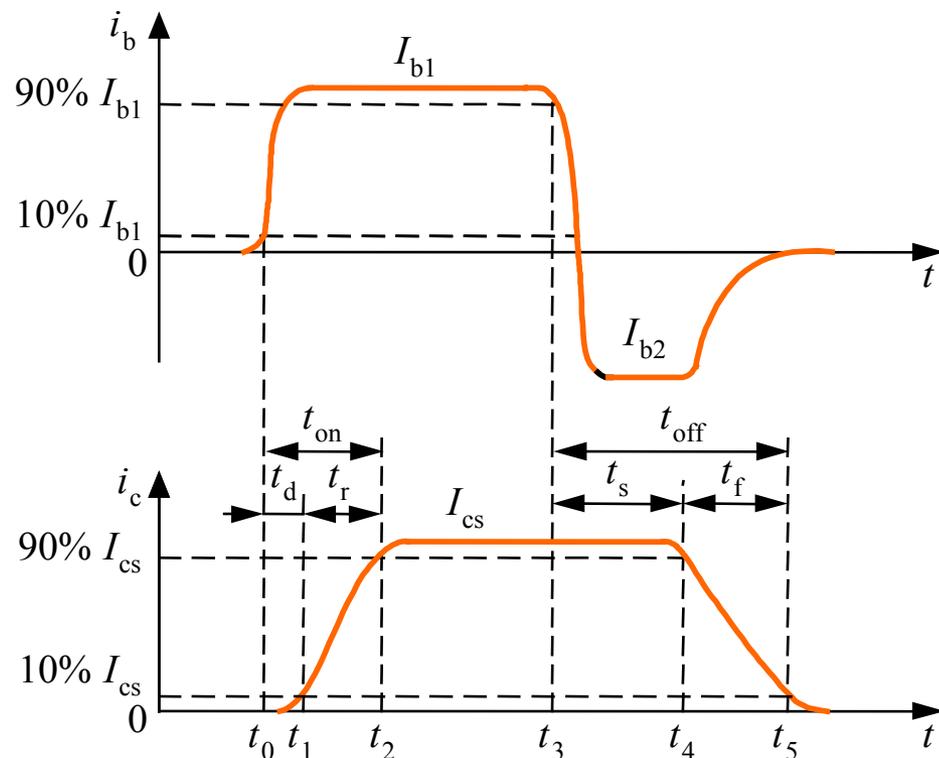


图 1-17 GTR 的开通和关断过程电流波形

4.2 电力晶体管

3) GTR 的主要参数

前已述及：电流放大倍数 β 、直流电流增益 h_{FE} 、集射极间漏电流 I_{ceo} 、集射极间饱和压降 U_{ces} 、开通时间 t_{on} 和关断时间 t_{off} (此外还有)：

1) 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。
- $BU_{cbo} > BU_{cex} > BU_{ces} > BU_{cer} > BU_{ceo}$ 。
- 实际使用时，最高工作电压要比 BU_{ceo} 低得多。

4.2 电力晶体管

2) 集电极最大允许电流 I_{CM}

- 通常规定为 h_{FE} 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。

3) 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



4.2 电力晶体管

4) 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。
 - ⊕ 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 突然急剧上升，电压陡然下降。

- **安全工作区 (Safe Operating Area——SOA)** 或者工作特性明显衰变。

- ⊕ 最高电压 U_{ceM} 、集电极最大电流 I_{cM} 、最大耗散功率 P_{cM} 、二次击穿临界线限定。

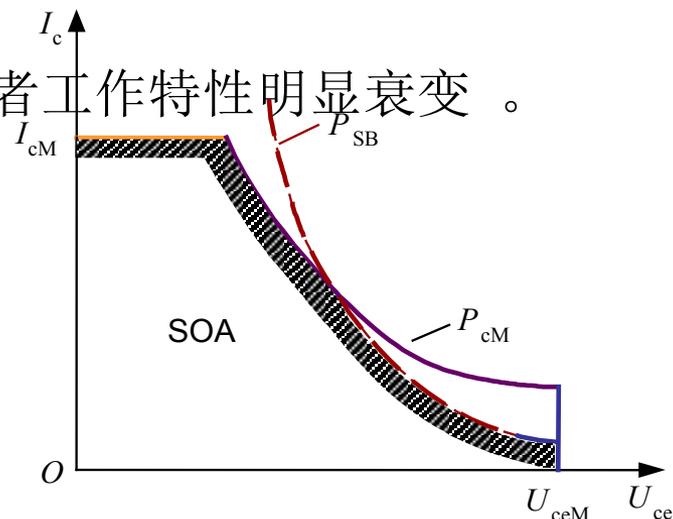


图 1-18 GTR 的安全工作区



4.3 电力场效应晶体管

电力场效应晶体管

- 分为**结型**和**绝缘栅型**
- 通常主要指**绝缘栅型**中的**MOS型**（Metal Oxide Semiconductor FET）
- 简称电力 MOSFET（Power MOSFET）
- 结型电力场效应晶体管一般称作静电感应晶体管（Static Induction Transistor——SIT）
- **特点**——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。

4.3 电力场效应晶体管

1) 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**。
- ⊕ **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。
- ⊕ 电力 MOSFET 主要是 **N 沟道增强型**。
- ⊕ **DATASHEET**

4.3 电力场效应晶体管

电力 MOSFET 的结构

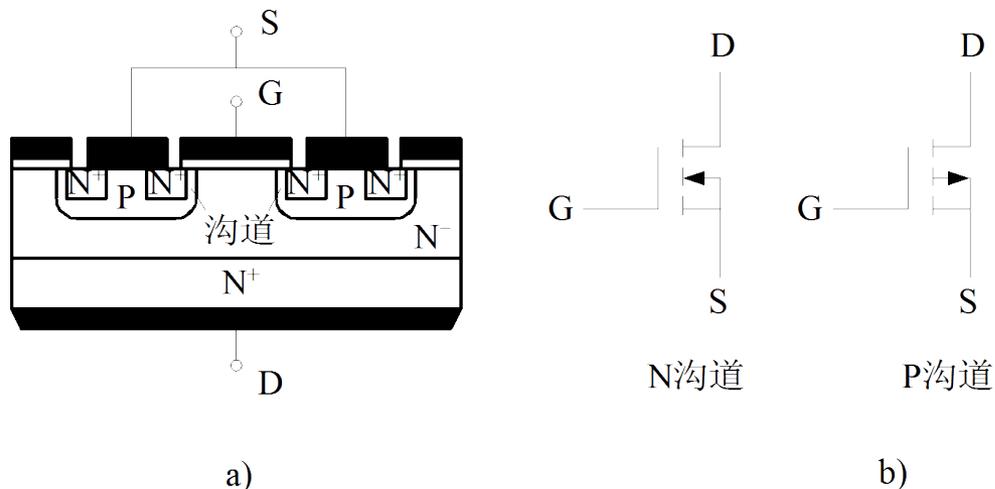


图 1-19 电力 MOSFET 的结构和电气图形符号

- 是单极型晶体管。
- 导电机理与小功率 MOS 管相同，但结构上有较大区别。
- 采用多元集成结构，不同的生产厂家采用了不同设计。

4.3 电力场效应晶体管

● 电力 MOSFET 的结构

- ✦ 小功率 MOS 管是横向导电器件。
- ✦ 电力 MOSFET 大都采用垂直导电结构，又称为 VMO SFET（Vertical MOSFET）。
- ✦ 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** 和具有垂直导电双扩散 MOS 结构的 **VDMOSFET**（Vertical Double-diffused MOSFET）。
-
- ✦ 这里主要以 VDMOS 器件为例进行讨论。

4.3 电力场效应晶体管

电力 MOSFET 的工作原理

- 截止：漏源极间加正电源，栅源极间电压为零。
 - P 基区与 N 漂移区之间形成的 PN 结 J_1 反偏，漏源极之间无电流流过。
- 导电：在栅源极间加正电压 U_{GS}
 - 当 U_{GS} 大于 U_T 时，P 型半导体反型成 N 型而成为反型层，该反型层形成 N 沟道而使 PN 结 J_1 消失，漏极和源极导电。

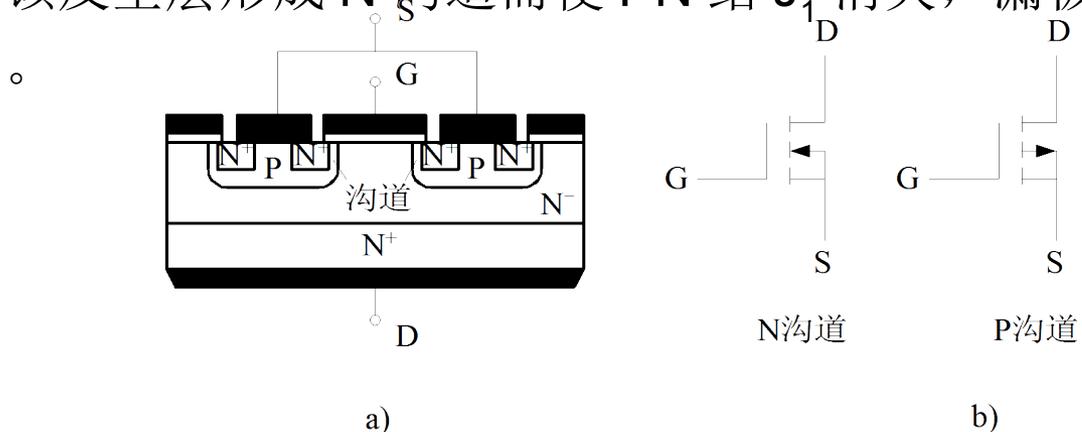


图 1-19 电力 MOSFET 的结构和电气图形符号

4.3 电力场效应晶体管

2) 电力 MOSFET 的基本特性

(1) 静态特性

● 漏极电流 I_D 和栅源间电压 U_{GS} 的关系称为 MOSFET 的转移特性。

● I_D 较大时, I_D 与 U_{GS} 的关系近似线性, 曲线的斜率定义为跨导 G_{fs} 。

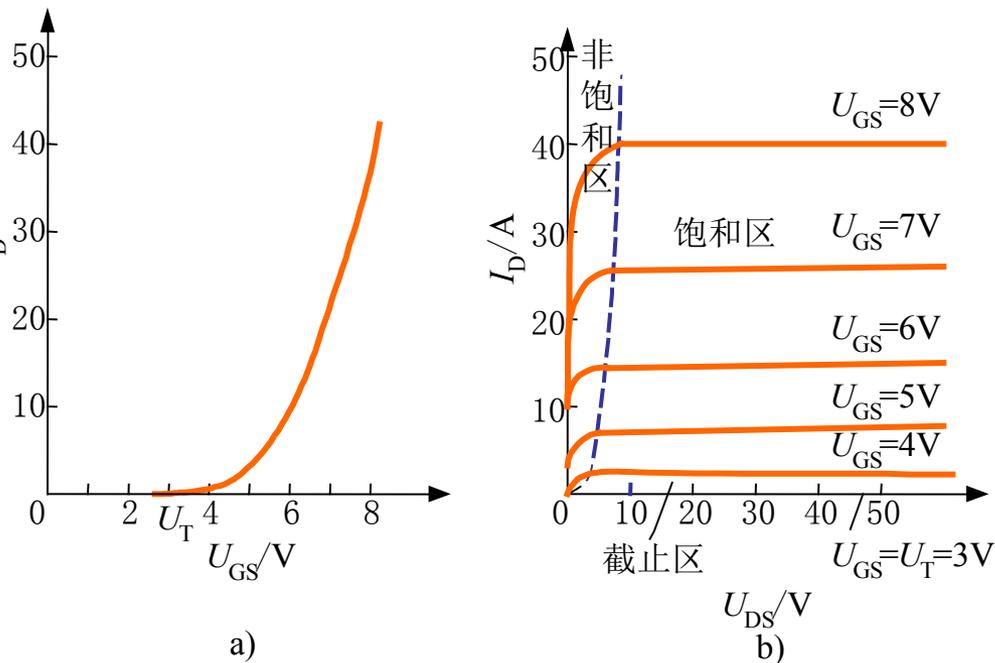


图 1-20 电力 MOSFET 的转移特性和输出特性
a) 转移特性 b) 输出特性

4.3 电力场效应晶体管

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 GTR 的饱和区）
- 工作在开关状态，即在截止区和非饱和区之间来回转换。

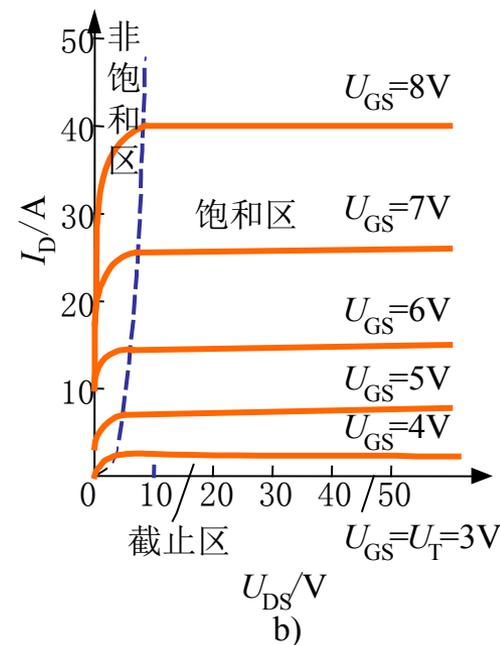
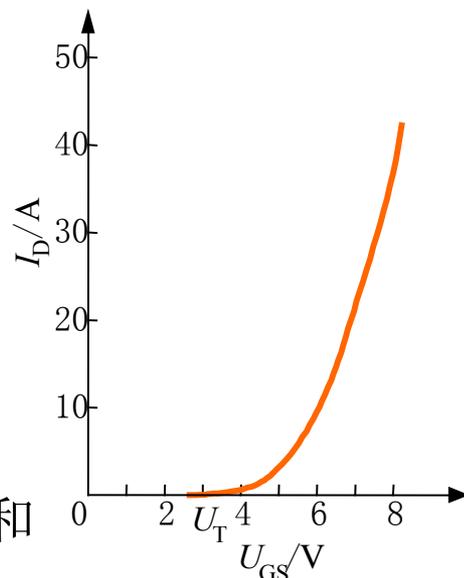


图 1-20 电力 MOSFET 的转移特性和输出特性

a) 转移特性 b) 输出特性

- 通态电阻具有正温度系数，对器件并联时的均流有利。

4.3 电力场效应晶体管

(2) 动态特性

● 开通过程

- ⊕ 开通延迟时间 $t_{d(on)}$
- ⊕ 上升时间 t_r
- ⊕ 开通时间 t_{on} —— 开通延迟时间与上升时间之和

● 关断过程

- ⊕ 关断延迟时间 $t_{d(off)}$
- ⊕ 下降时间 t_f
- ⊕ 关断时间 t_{off} —— 关断延迟时间和下降时间之和

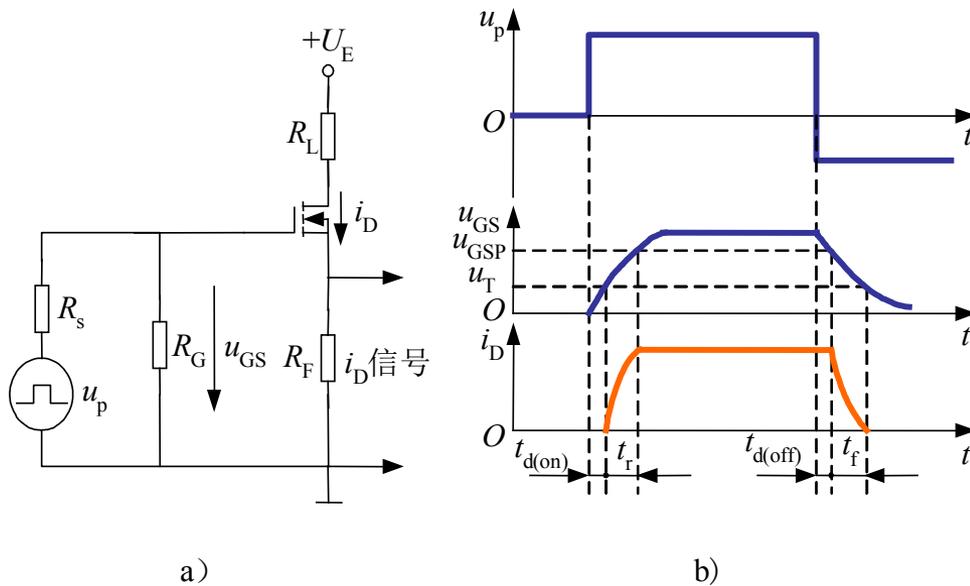


图 1-21 电力 MOSFET 的开关过程

a) 测试电路 b) 开关过程波形
 u_p —脉冲信号源, R_s —信号源内阻,
 R_G —栅极电阻,
 R_L —负载电阻, R_F —检测漏极电流

4.3 电力场效应晶体管

● MOSFET 的开关速度

- ⊕ MOSFET 的开关速度和 C_{in} 充放电有很大关系。
- ⊕ 可降低驱动电路内阻 R_s 减小时间常数，加快开关速度。
- ⊕ 不存在少子储存效应，关断过程非常迅速。
- ⊕ 开关时间在 10~100ns 之间，工作频率可达 100kHz 以上，是主要电力电子器件中最高的。
- ⊕ 场控器件，静态时几乎不需输入电流。但在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，所需要的驱动功率越大。

4.3 电力场效应晶体管

3) 电力 MOSFET 的主要参

数除跨导 G_{fs} 、开启电压 U_T 以及 $t_{d(on)}$ 、 t_r 、 $t_{d(off)}$ 和 t_f 之外
还有 **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}**

—— $|U_{GS}| > 20V$ 将导致绝缘层击穿。

(4) **极间电容**

—— 极间电容 C_{GS} 、 C_{GD} 和 C

4.4 绝缘栅双极晶体管

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** ） (DATASHEET 1 2)
 - ⊕ 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。

4.4 绝缘栅双极晶体管

1) IGBT 的结构和工作原理

● 三端器件：栅极 G、集电极 C 和发射极 E

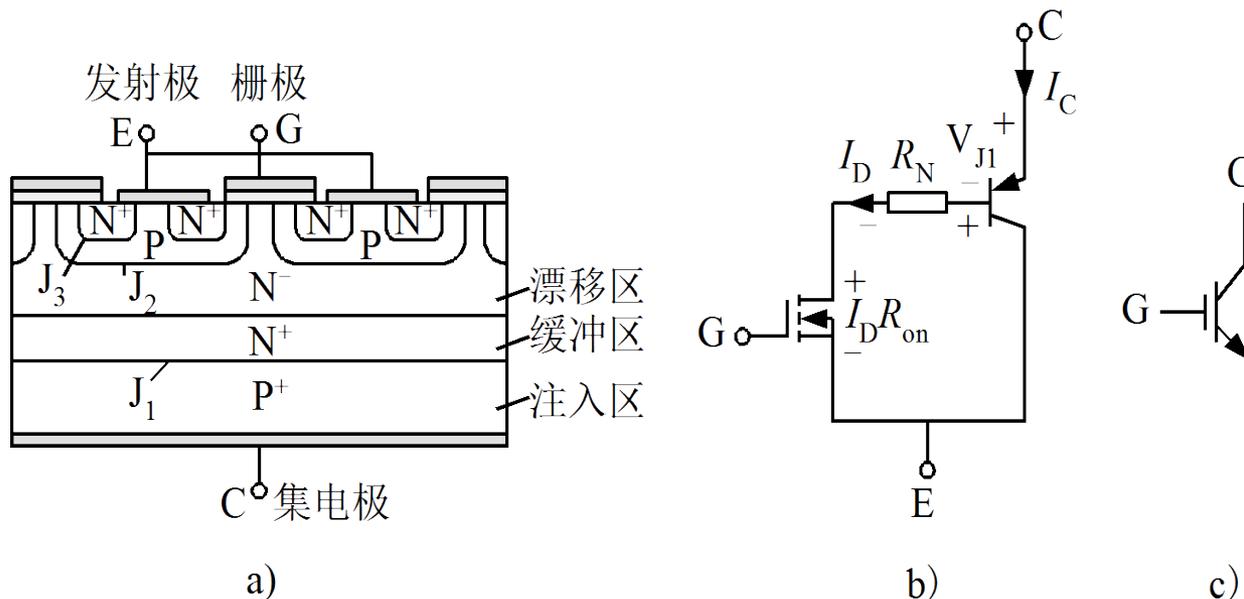


图 1-22 IGBT 的结构、简化等效电路和电气图形符号
a) 内部结构断面示意图 b) 简化等效电路 c) 电气图形符号

4.4 绝缘栅双极晶体管

IGBT 的结构

- 图 1-22a—N 沟道 VDMOSFET 与 GTR 组合——N 沟道 IGBT。
- IGBT 比 VDMOSFET 多一层 P^+ 注入区，具有很强的通流能力。
- 简化等效电路表明，IGBT 是 GTR 与 MOSFET 组成的达林顿结构，一个由 MOSFET 驱动的厚基区 PNP 晶体管。

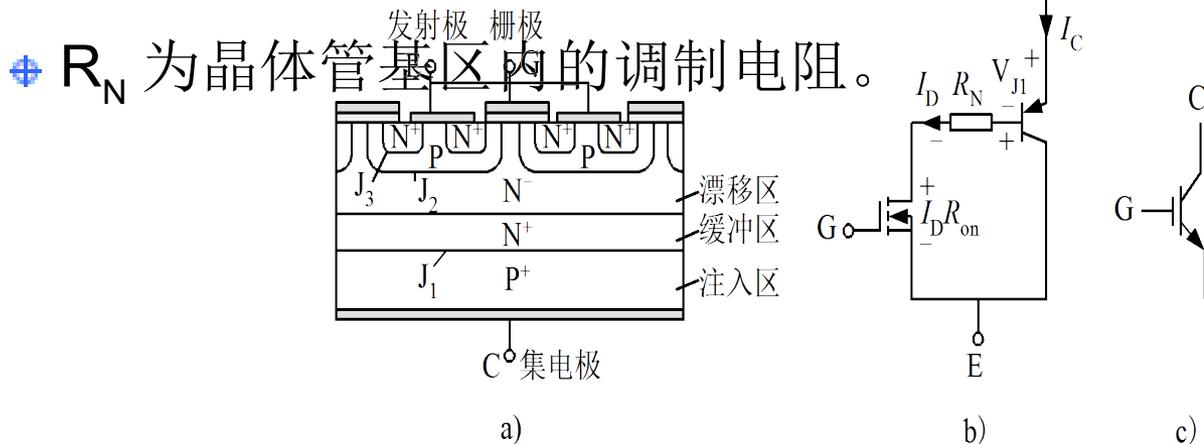


图 1-22 IGBT 的结构、简化等效电路和电气图形符号

a) 内部结构断面示意图 b) 简化等效电路 c) 电气图形符号

4.4 绝缘栅双极晶体管

IGBT 的原理

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。

⊕ **通态压降**： 电导调制效应使电阻 R_N 减小，使通态压降减小。

⊕ **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。

4.4 绝缘栅双极晶体管

2) IGBT 的基本特性

(1) IGBT 的静态特性

输出特性

- 分为三个区域：
正向阻断区、有源区和饱和区。

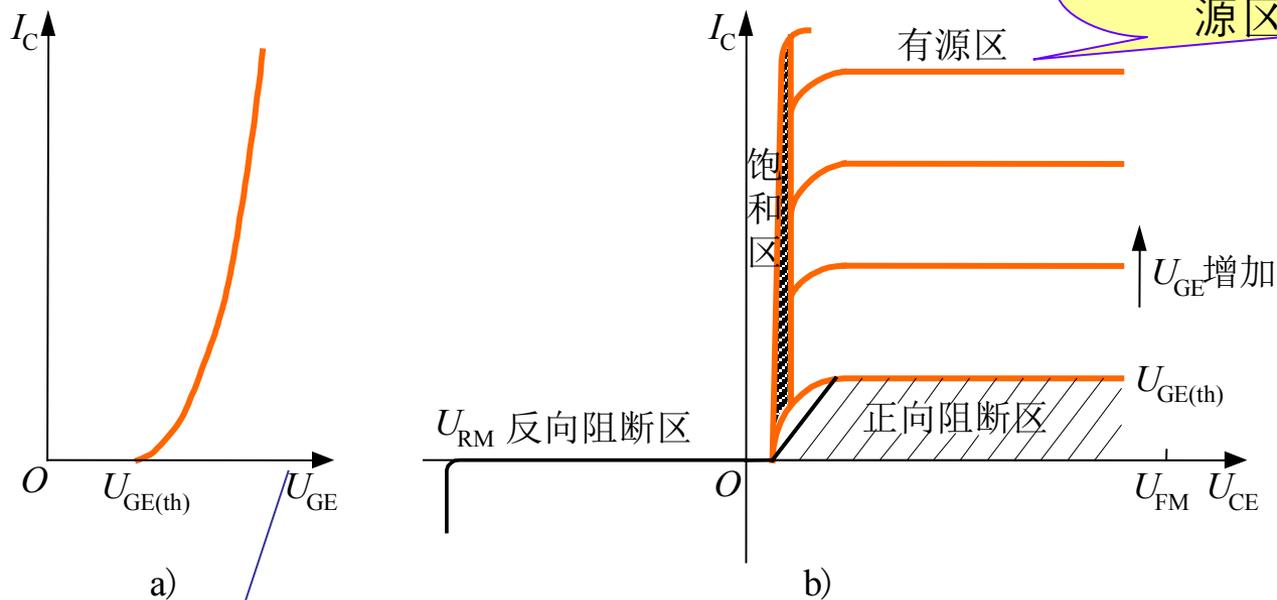


图 1-23 IGBT 的转移特性和输出特性
a) 转移特性 b) 输出特性

转移特性—— I_c 与 U_{GE} 间的关系 (开启电压 $U_{GE(th)}$)

4.4 绝缘栅双极晶体管

(2) IGBT 的动态特性

IGBT 的开通过程

与 MOSFET 的相似

⊕ 开通延迟时间 $t_{d(on)}$

⊕ 电流上升时间 t_r

⊕ 开通时间 t_{on}

⊕ u_{CE} 的下降过程分为 t_{fv1} 和 t_{fv2} 两段。

t_{fv1} ——IGBT 中 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

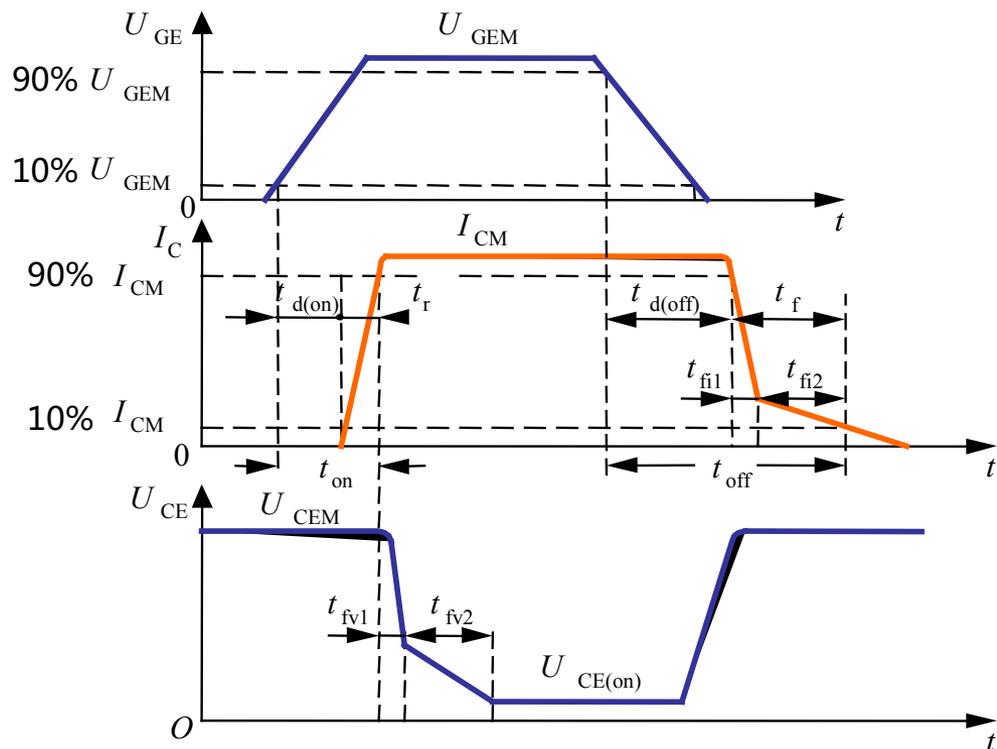


图 1-24 IGBT 的开关过程

4.4 绝缘栅双极晶体管

IGBT 的关断过程

- 关断延迟时间 $t_{d(off)}$
- 电流下降时间
- 关断时间 t_{off}
- 电流下降时间又可分为 t_{fi1} 和 t_{fi2} 两段。
- 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。

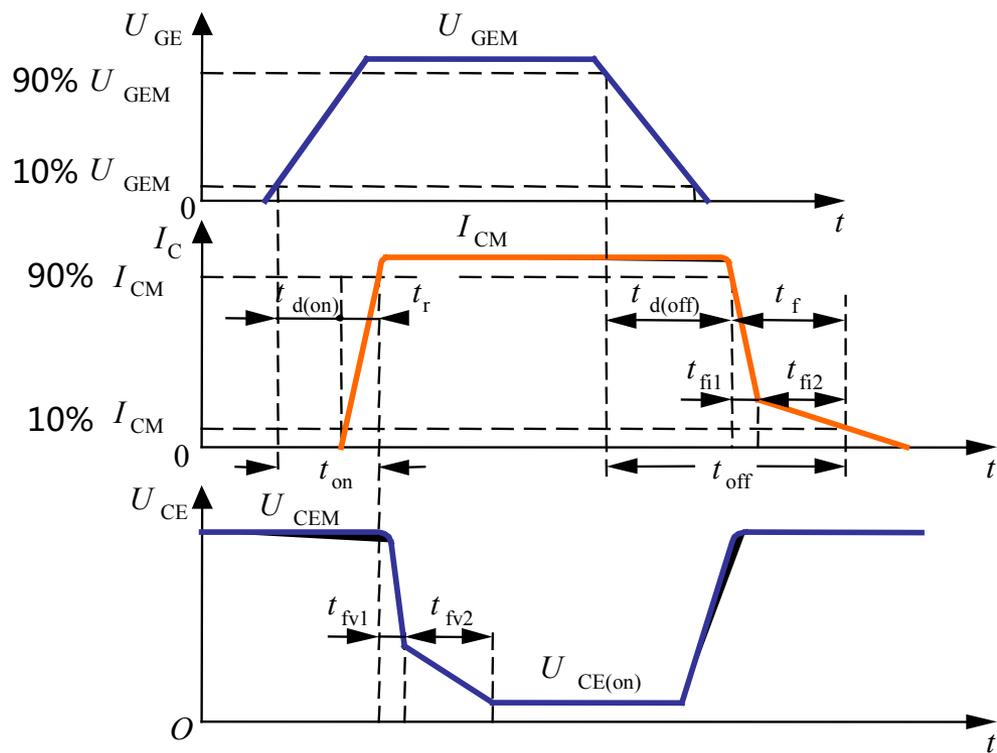


图 1-24 IGBT 的开关过程

4.4 绝缘栅双极晶体管

3) IGBT 的主要参数

(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

。

4.4 绝缘栅双极晶体管

● 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。
- ⊕ 相同电压和电流定额时，安全工作区比 GTR 大，且具有耐脉冲电流冲击能力。
- ⊕ 通态压降比 VDMOSFET 低。
- ⊕ 输入阻抗高，输入特性与 MOSFET 类似。
- ⊕ 与 MOSFET 和 GTR 相比，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。

4.4 绝缘栅双极晶体管

● 擎住效应或自锁效应：

——NPN 晶体管基极与发射极之间存在体区短路电阻，P 形体区的横向空穴电流会在该电阻上产生压降，相当于对 J_3 结施加正偏压，一旦 J_3 开通，栅极就会失去对集电极电流的控制作用，电流失控。动态擎住效应比静态擎住效应所允许的集电极电流小。

✦ 擎住效应曾限制 IGBT 电流容量提高，20 世纪 90 年代中后期开始逐渐解决。

● 正偏安全工作区（FBSOA）

——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（RBSOA）

——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 确定。

● IGBT 往往与反并联的快速二极管封装在一起，制成模块，成为逆导器件。

1.5 其他新型电力电子器件

1.5.1 MOS控制晶闸管MCT

1.5.2 静电感应晶体管SIT

1.5.3 静电感应晶闸管SITH

1.5.4 集成门极换流晶闸管IGCT

1.5.5 功率模块与功率集成电路

1.5.1 MOS 控制晶闸管 MCT

● MCT (MOS Controlled Thyristor) —— MOSFET 与晶闸管的复合 (DATASHEET)

- ⊕ MCT 结合了二者的优点：
 - 承受极高 di/dt 和 du/dt ，快速的开关过程，开关损耗小。
 - 高电压，大电流、高载流密度，低导通压降。
- ⊕ 一个 MCT 器件由数以万计的 MCT 元组成。
- ⊕ 每个元的组成为：一个 PNP 晶闸管，一个控制该晶闸管开通的 MOSFET，和一个控制该晶闸管关断的 MOSFET。
- ⊕ 其关键技术问题没有大的突破，电压和电流容量都远未达到预期的数值，未能投入实际应用。

1.5.2 静电感应晶体管 SIT

● SIT (Static Induction Transistor) ——结型场效应晶体管

- ◆ 多子导电的器件，工作频率与电力 MOSFET 相当，甚至更高，功率容量更大，因而适用于高频大功率场合。
- ◆ 在雷达通信设备、超声波功率放大、脉冲功率放大和高频感应加热等领域获得应用。

● 缺点：

- ◆ 栅极不加信号时导通，加负偏压时关断，称为**正常导通型**器件，使用不太方便。
- ◆ 通态电阻较大，通态损耗也大，因而还未在大多数电力电子设备中得到广泛应用。

1.5.3 静电感应晶闸管 SITH

◆ **SITH** (Static Induction Thyristor) ——场控晶闸管 (Field Controlled Thyristor—FCT)

- ◆ SITH 是两种载流子导电的双极型器件，具有电导调制效应，通态压降低、通流能力强。
- ◆ 其很多特性与 GTO 类似，但开关速度比 GTO 高得多，是大容量的快速器件。
- ◆ SITH 一般也是正常导通型，但也有正常关断型。此外，电流关断增益较小，因而其应用范围还有待拓展。

1.5.4 集成门极换流晶闸管 IGCT

● **IGCT** (Integrated Gate-Commutated Thyristor)

GCT (Gate-Commutated Thyristor)

✦ 20 世纪 90 年代后期出现，结合了 IGBT 与 GTO 的优点，容量与 GTO 相当，开关速度快 10 倍。

✦ 可省去 GTO 复杂的缓冲电路，但驱动功率仍很大。

✦ 目前正在与 IGBT 等新型器件激烈竞争，试图最终取代 GTO 在大功率场合的位置。

✦ DATASHEET 1 2

1.5.5 功率模块与功率集成电路

基本概念

- ✦ 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** ）。
- ✦ DATASHEET

1.5.5 功率模块与功率集成电路

实际应用电路

- ◆ **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 ）。

1.5.5 功率模块与功率集成电路

发展现状

- 功率集成电路的主要技术难点：高低压电路之间的绝缘问题以及温升和散热的处理。
- 以前功率集成电路的开发和研究主要在中小功率应用场合。
- 智能功率模块在一定程度上回避了上述两个难点，最近几年获得了迅速发展。
- 功率集成电路实现了电能和信息的集成，成为机电一体化的理想接口。