



杭州电子科技大学

# 《电力电子技术》

## 第四讲

---



自动化学院

## 1.5 功率MOSFET

### 一、结构

- 一个器件由许多元胞并联而成
- 器件采用垂直结构

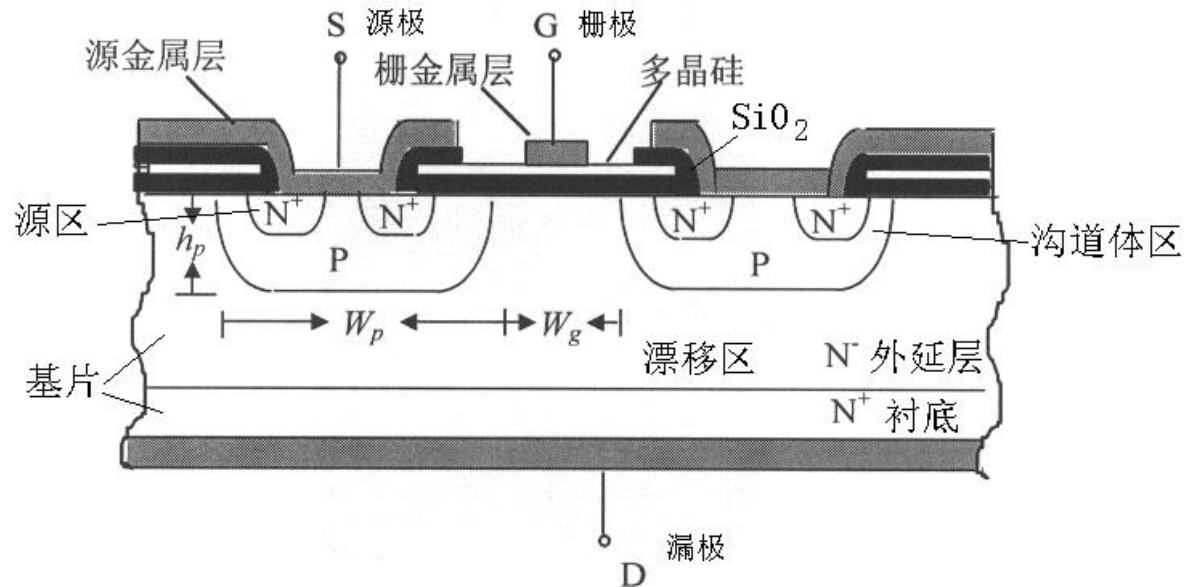


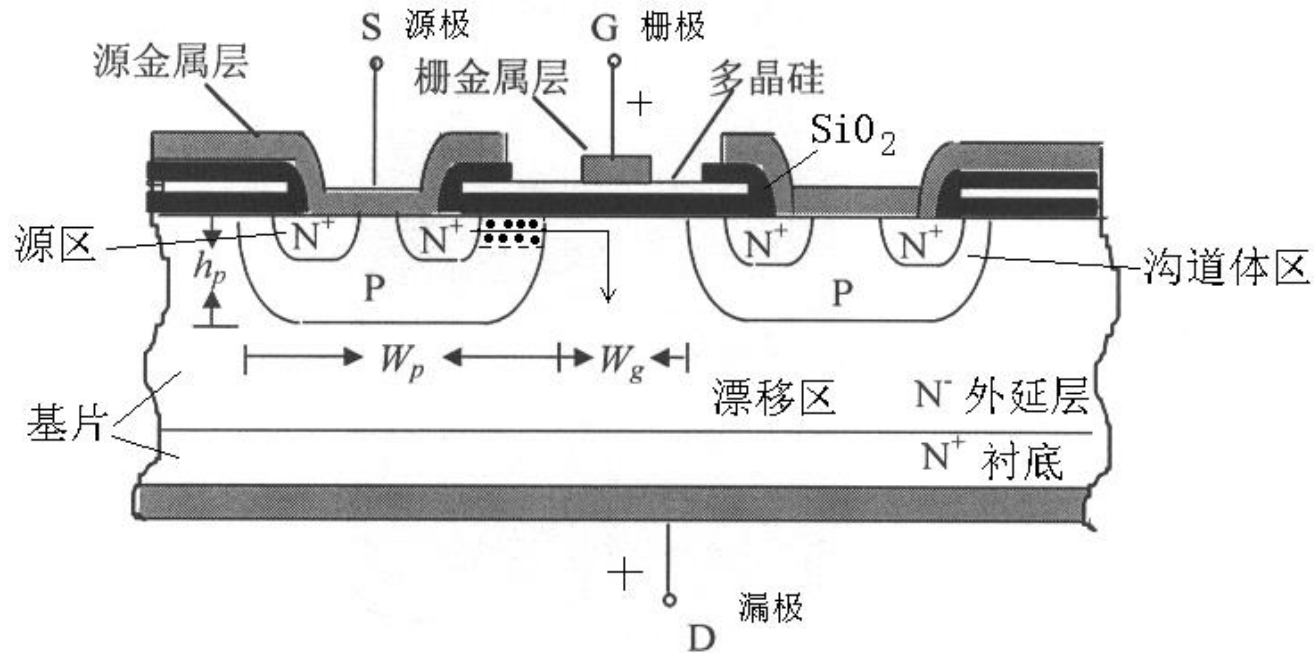
图 1-23: N 沟道 VDMOS 管元胞结构

- 栅极与基片之间隔着 $\text{SiO}_2$ 薄层，因此它同其它两个极之间是绝缘的，只要 $\text{SiO}_2$ 层不被击穿，栅极对源极之间的阻抗是非常高的，因此驱动电流较小。

## 1.5 功率MOSFET

### 工作原理

- $V_{GS} > 0$ ，并达到一定正电压 → 形成反型层 → 导电沟道 → 形成电子流



## 1.5 功率MOSFET

### 工作原理

- 器件的（栅极）开启电压就是栅表面出现反型层时的电压。一般设计成 $2\sim 4V$ 。
- VDMOS不存在电导调制效应，其导通电阻取决于导电通路上等效总电阻
- 耐压越高的器件，其导通电阻越大

## 静态输出特性

- 功率 MOSFET 的静态输出特性：分可变电阻区、饱和区和截止区。
- 可变电阻区（充分导通后）： $u_{gs} > U_T$ ，输出电流  $i_D$  随电压  $u_{DS}$  线性改变。沟道电阻随栅极电压的上升而下降，直至不再减少，源漏极电阻就是导通电阻。
- 饱和区：反映出沟道夹断后漏极电流被限制的情况，器件具有较高的输出阻抗。

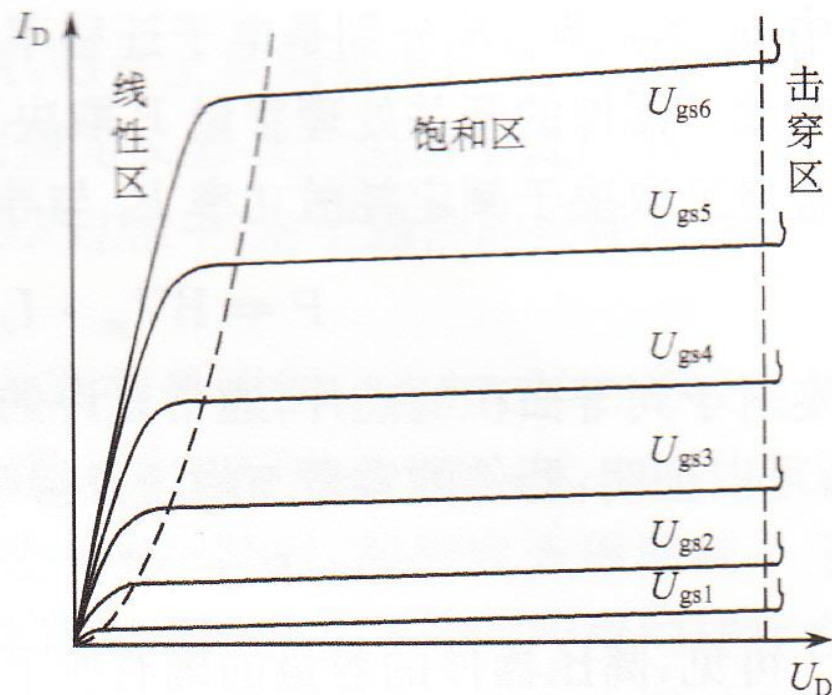


图 1.31 功率 MOSFET 的静态输出特性

## 静态输出特性

- 截止区:  $u_{gs} < U_T$ , 沟道被夹断, 因此仅有微弱的漏电流通过。
- 作为电力电子应用, 功率MOSFET基本运行在开关状态, 尽量避免在饱和区运行, 以降低器件的功率损耗。要记住, 作为电子开关, 器件导通时应处在低电压降的状态。

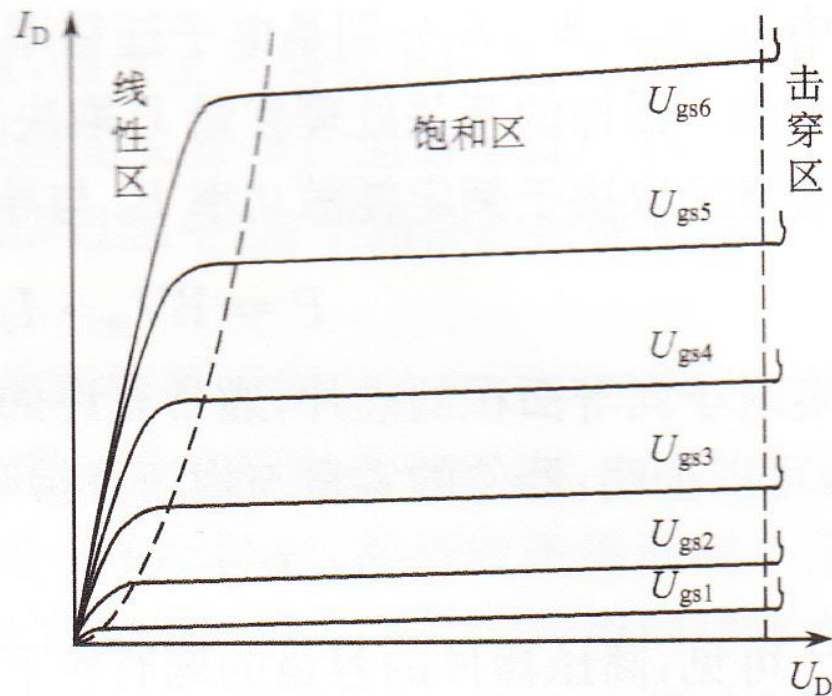


图 1.31 功率 MOSFET 的静态输出特性



## 动态特性

- 功率 MOSFET, 以速度快为显著特点。开关切换速度通常都在亚微秒数量级, 在数十千赫兹以进上的开关频率工作时, 对器件损耗的影响才明显起来。
- 功率MOSFET在结构上存在一个反向并联的二极管, 因此不能阻挡反向电流的导通。

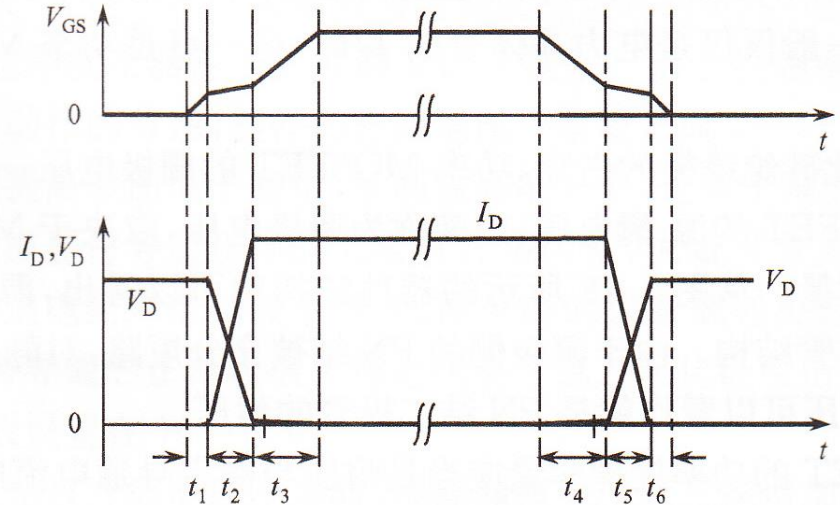


图 1.32 器件在电阻性负载下的开关过程

## 应用特点

- 功率MOSFET是性能理想的中小容量的高速压控型器件, 广泛应用于各种中小型电力电子装置中。
- 它的控制要求简单, 但器件成本比电力晶体管高, 在中小功率电力电子装置中正在全面取代电力晶体管。
- 功率 MOSFET的开关工作频率通常可达100kHz (硬开关电路) 至数兆赫兹 (软开关电路)



## 应用特点

- 功率MOSFET的导通压降具有正的温度系数, 通常简单的并联就能保证器件的均流工作。
- 脉冲过电流能力也很强, 安全可靠性能高于电力晶体管。
- 属于多子导电的器件, 但不能利用少数载流子来降低导通压降, 难以在大功率领域发挥作用。

## 1.6 功率复合器件IGBT

- 绝缘栅双极型复合晶体管 (insulated gate bi-polar transistor, IGBT), 是功率场效应晶体管与双极型晶体管所形成的复合器件。它采用了与 MOSFET 类似的制造工艺, 器件原胞尺寸与 MOSFET 接近, 而比电力晶体管要小得多。图1.34是N沟道的IGBT的结构示意。

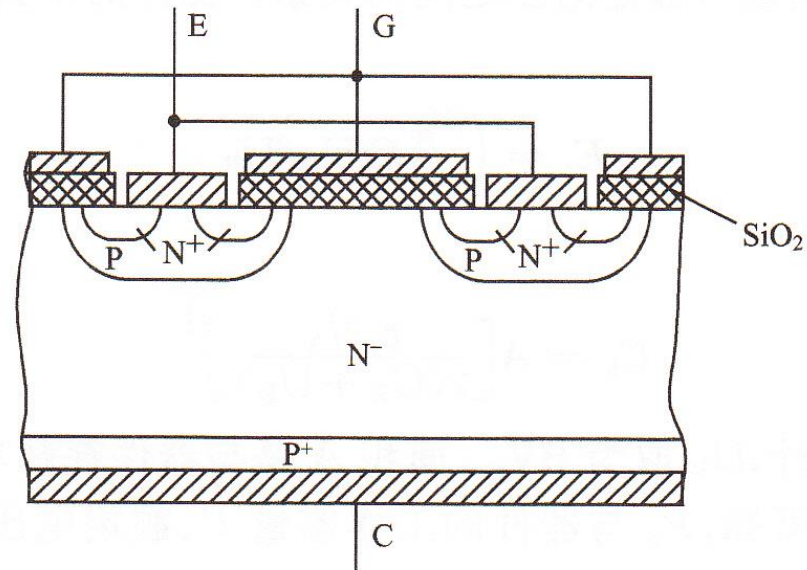


图 1.34 IGBT 的结构

## 1.6 功率复合器件IGBT

### 结构与工作原理

- **IGBT**: 在功率MOSFET基础上增加了一层与沟道性质相反的半导体。
- 器件的三个电极分别为**栅极**、**发射极**和**集电极**。

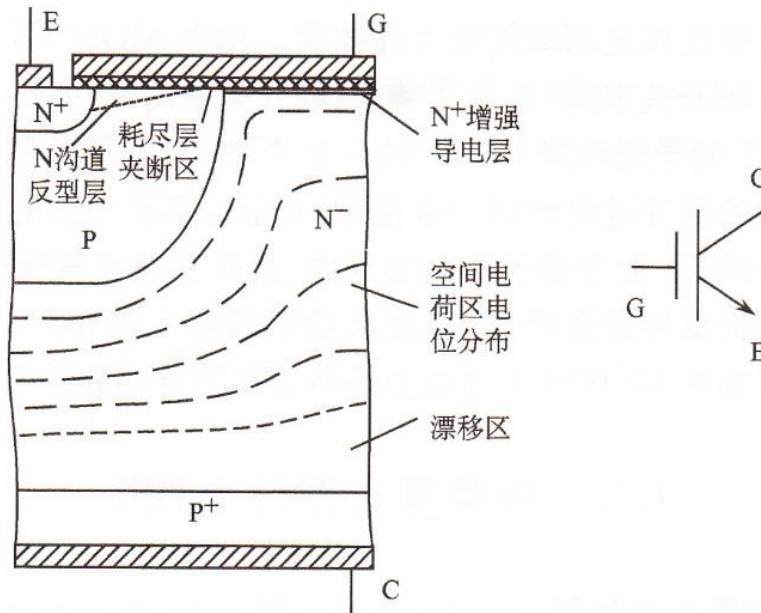
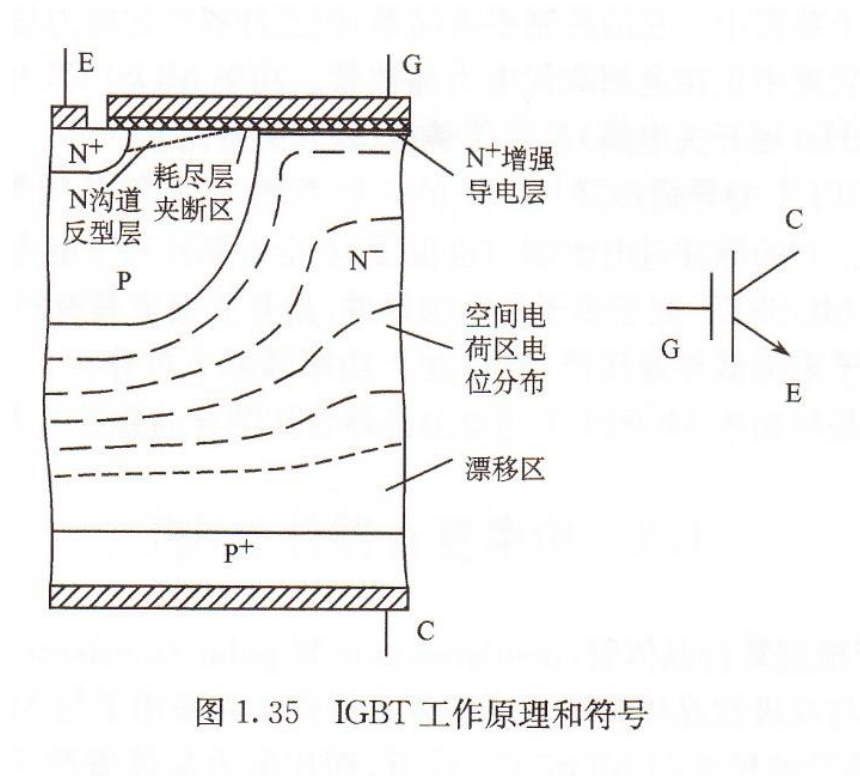


图 1.35 IGBT 工作原理和符号

## 1.6 功率复合器件IGBT

### 结构与工作原理

- 新形成的PN结, 使少数载流子参与了器件的导通, 引入了电导调制效应, 降低了开通压降, 因此比较容易做成高耐压器件。



## 1.6 功率复合器件IGBT

IGBT的两种模型：

- MOSFET与晶体二极管的组合模型。
- MOSFET与晶体三极管的组合模型。

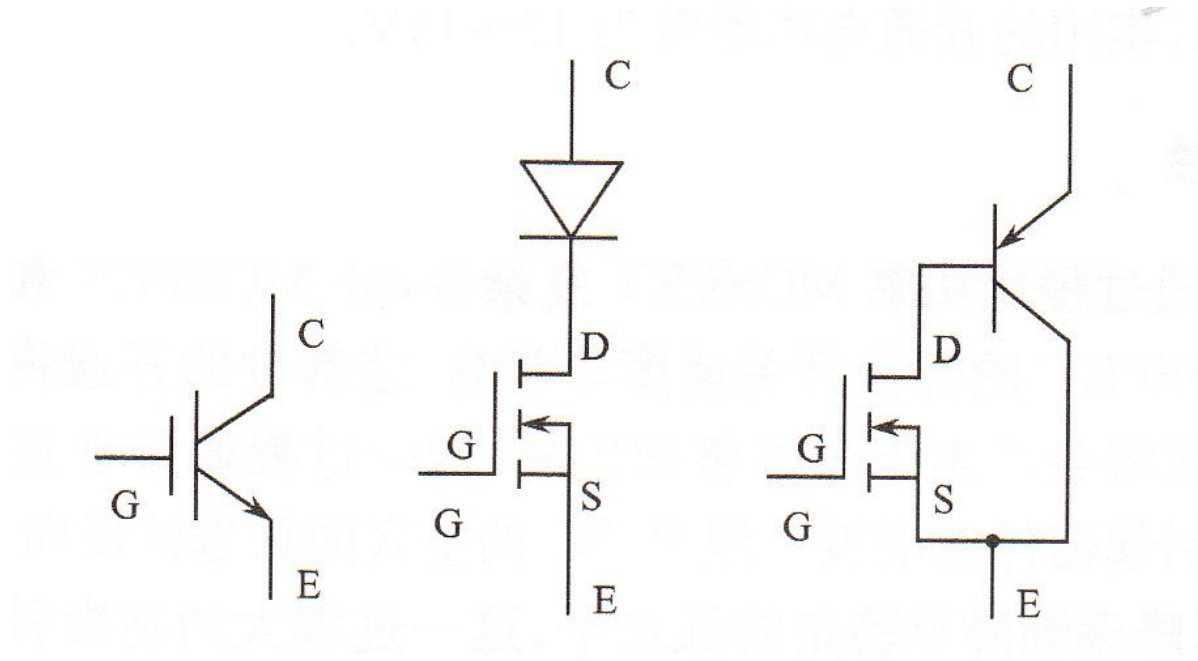


图 1.36 IGBT 的等效原理图

## 1.6 功率复合器件IGBT

- MOSFET与晶体二极管的组合模型，表明IGBT导通时具有一个二极管的**起始电压降**。

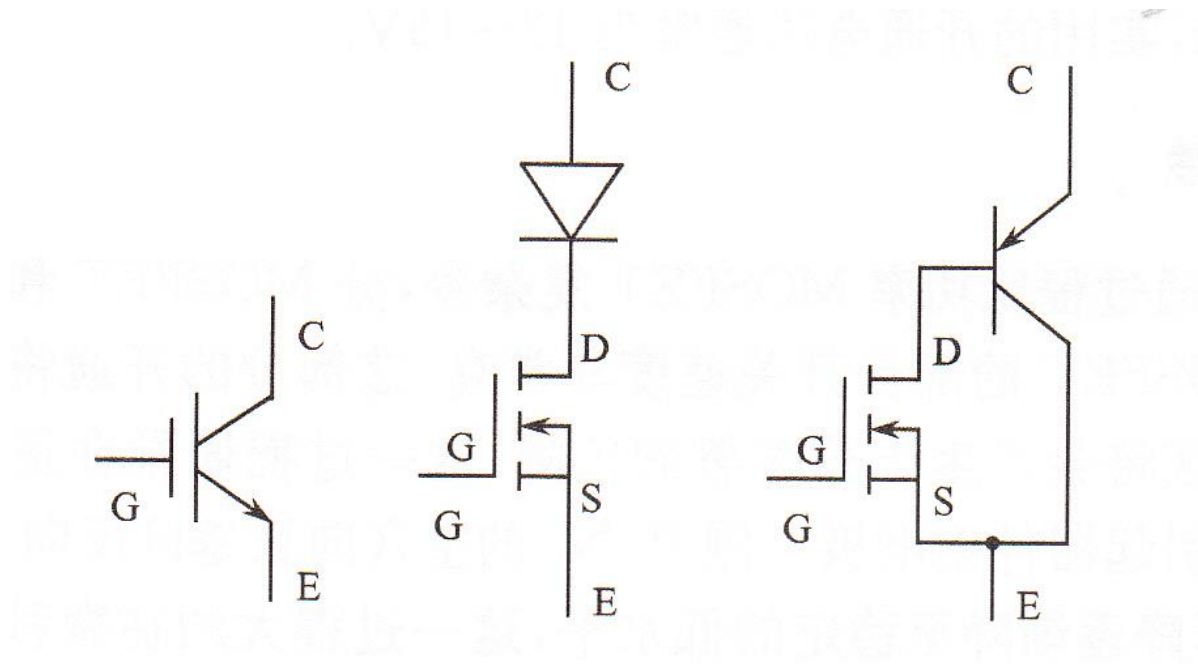


图 1.36 IGBT 的等效原理图



## 1.6 功率复合器件IGBT

- MOSFET与晶体三极管的组合模型：IGBT不仅具有**电压控制**特点, 还具有**耐受高电流密度**的能力, 其允许的电流密度甚至显著超过了电力晶体管。

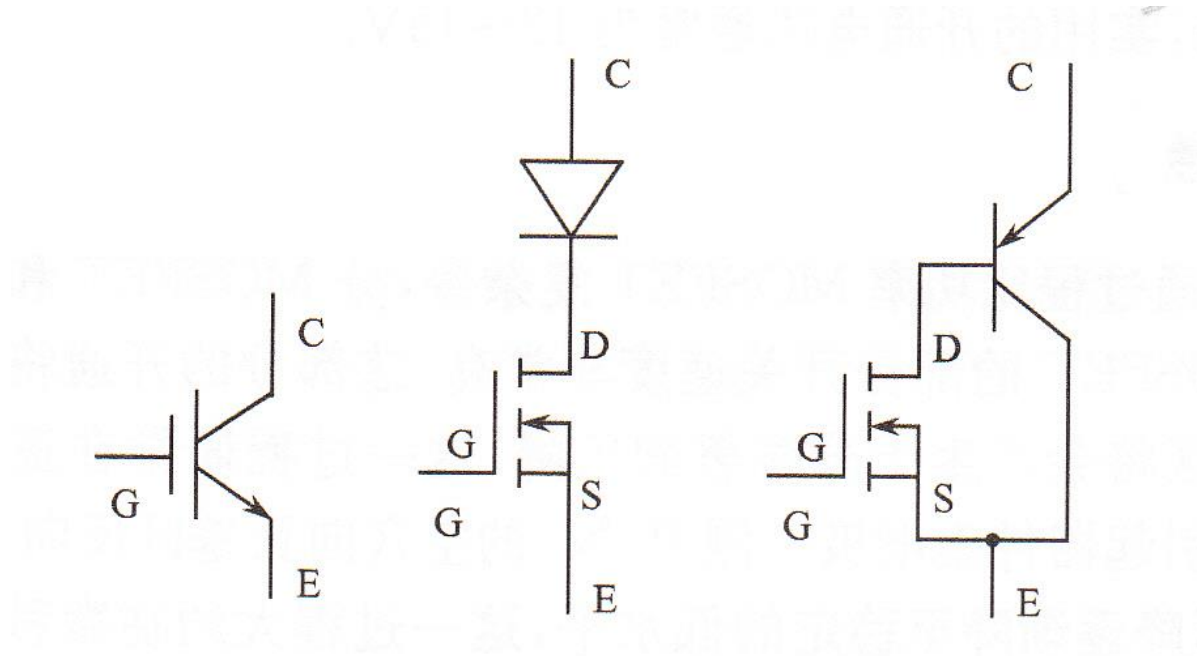


图 1.36 IGBT 的等效原理图

## 1.6 功率复合器件IGBT

### 静态特性

输出特性分为：可变电阻区、饱和区和截止区三个部分。

- 可变电阻区：  
低电流区域，主要电压降落在等效二极管上；  
高电流区域，沟道电阻占导，器件具有正温度特性。

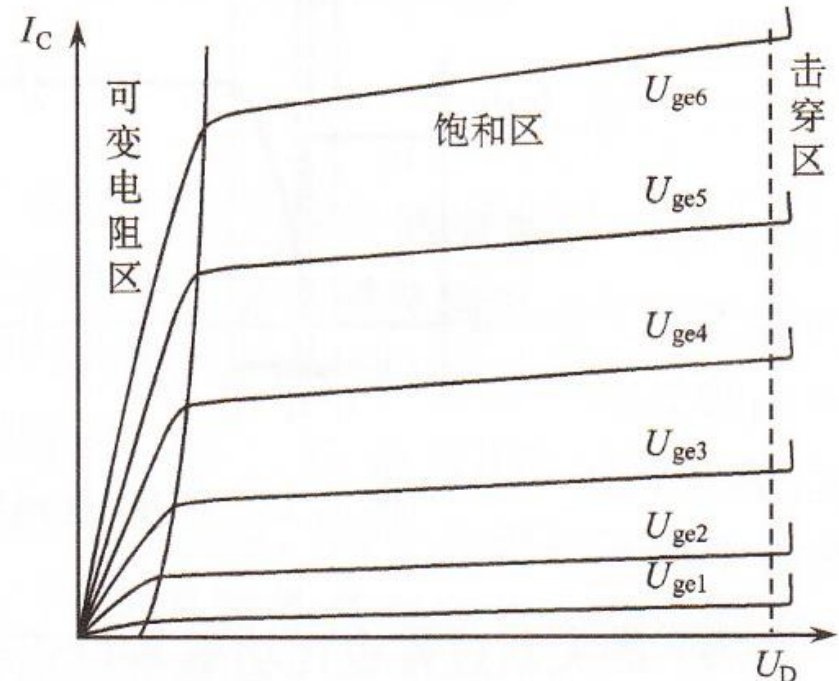


图 1.37 IGBT 的输出特性

## 1.6 功率复合器件IGBT

### 静态特性

- 饱和区：IGBT的输出特性不如功率 MOSFET 平坦。
- 截止区：与功率MOSFET的特性相同。

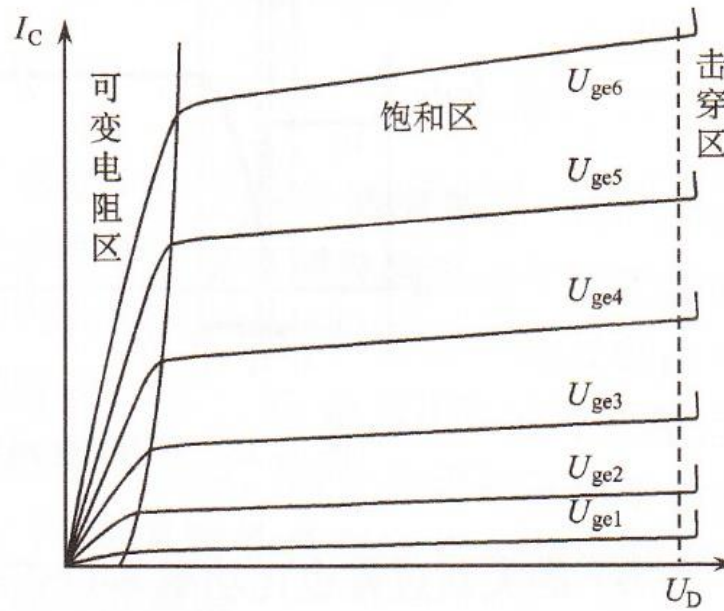


图 1.37 IGBT 的输出特性

## 1.6 功率复合器件IGBT

**动态特性之开通：**分MOSFET和晶体管两部分的开通。

- MOSFET的部分开关速度非常高，通常在亚微秒数量级。
- 随后，电子电流将引起器件集电极一侧P+N的空穴向长基区反向注入，器件的压降逐渐降低，微秒数量级。
- 开关工作频率通常在**数十千赫兹以内**。

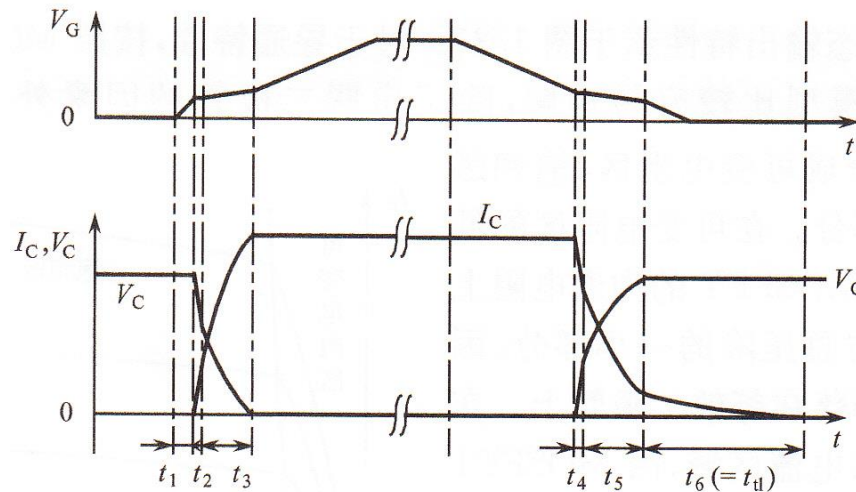


图 1.38 IGBT 在电阻性负载下的开关波形

## 1.6 功率复合器件IGBT

**动态特性之关断：** 器件加上关断信号并使栅极电压低于开启电压

- MOSFET部分的多子电流被切断。
- 等效晶体管部分呈基极开路, 器件电流逐渐下降, 并承受集电极电压。
- 长基区载流子的复合衰减过程→尾部电流时间  $t_{tl}$ 。显示了IGBT具有双极型导电性质。

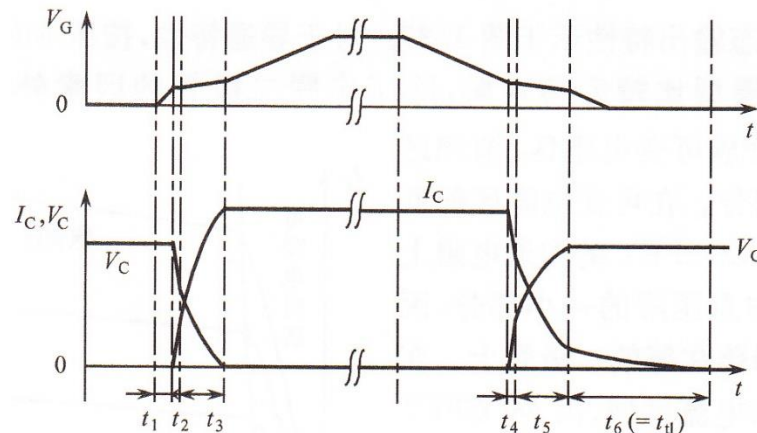
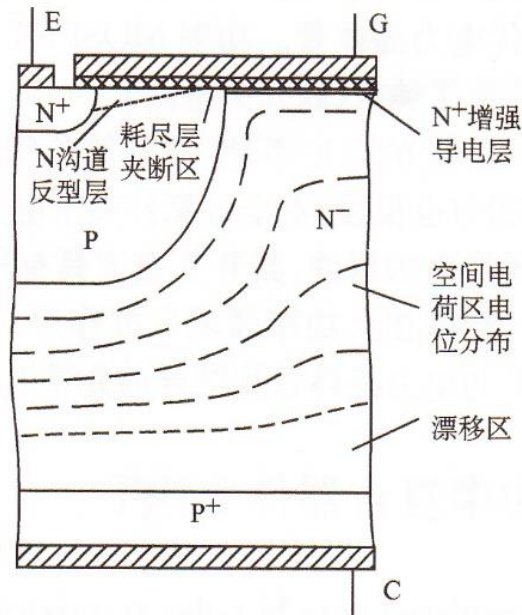


图 1.38 IGBT 在电阻性负载下的开关波形

## 1.6 功率复合器件IGBT

### 锁拴效应 (latch up)

IGBT在结构上隐含了 $N^+PN^-P^+$ 晶闸管，某些情况可造成晶闸管的开通触发。





## 1.6 功率复合器件IGBT

### 应用特点

- 性能理想的中大容量的中高速压控型器件, 广泛应用于各种中大型电力电子装置中。
- 控制要求简单, 在中大功率电力电子装置中正在全面取代电力晶体管。
- 工作频率通常可达20kHz, 其中快速型器件可以工作到50kHz甚至更高。
- 工作电压通常可达1200V以上, 也有2~3kV的高压器件可供选用。

## 1.6 功率复合器件IGBT

### 应用特点

- 在电流耐量方面,综合了功率MOSFET与电力晶体管的导电特性,额定工作电流在数十安至千安级。
- 容易并联工作。
- IGBT的输出部分包含双极性导电结构,与功率MOSFET相比有较长的尾部电流时间。