

## 1.3 功率二极管

功率二极管是电力电子电路最基本的组成单元，具有单向导电性，可用于整流、箝位、续流。

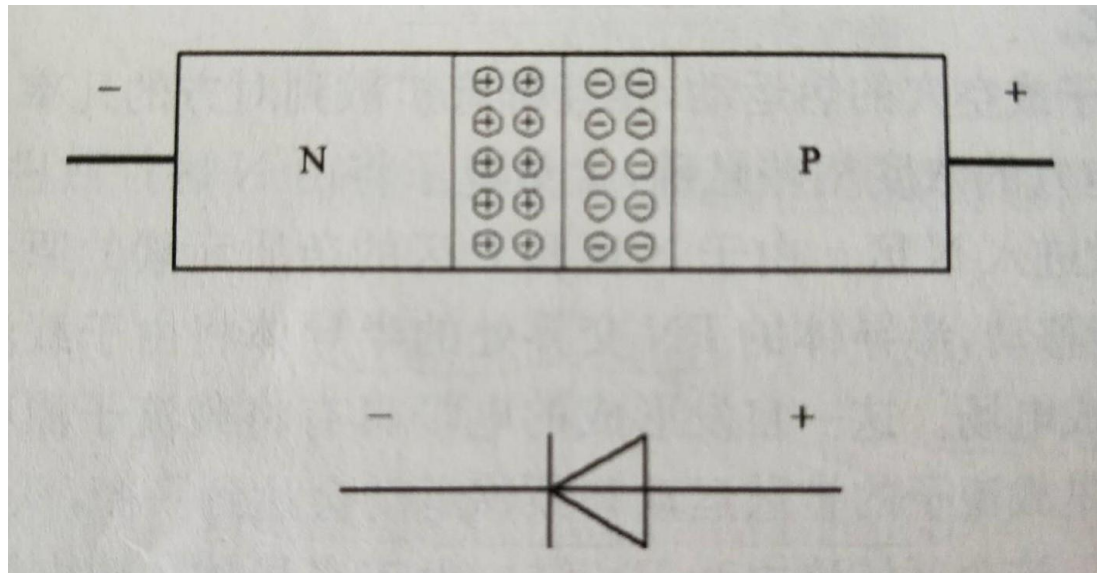
### 一、根据器件的基本结构分类

- (1) PN结功率二极管
- (2) 肖特基 (Schottky) 功率二极管

# 1) PN结功率二极管

## 1. 结构

- 具有P-N或P-i-N结构，通过扩散工艺制作。
- 利用PN结势垒制成的二极管
- N型半导体多数载流子为电子，空穴为少数载流子，宏观电中性
- P型半导体多数载流子为空穴，电子为少数载流子，宏观电中性

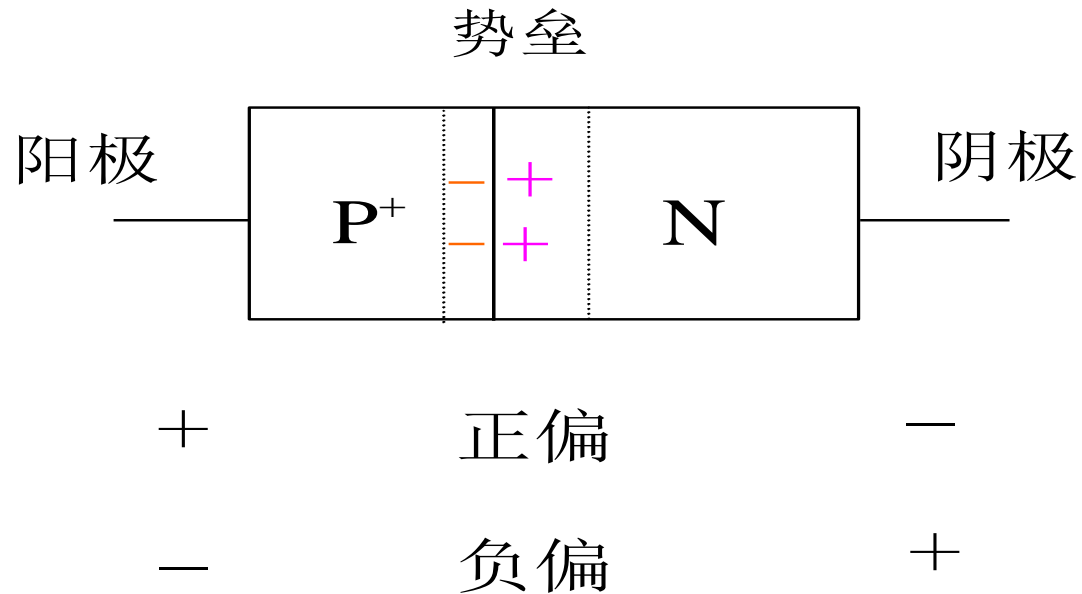


# 1) PN结功率二极管

## 1. 工作原理

多子→扩散运动

少子→漂移运动



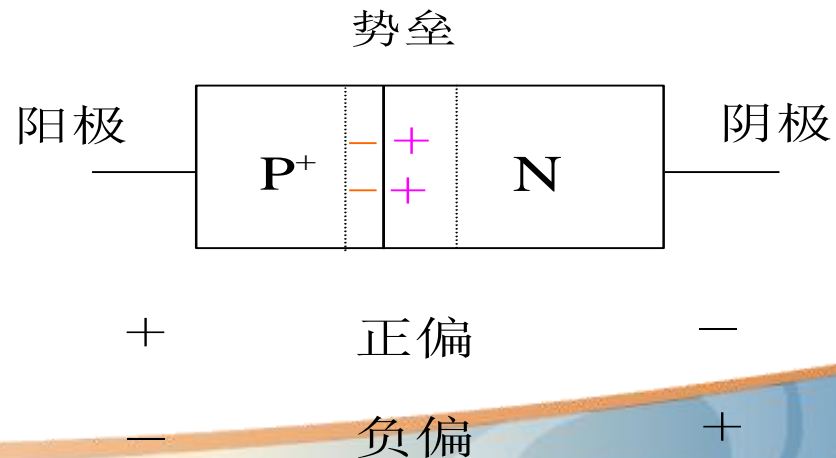
# 1) PN结功率二极管

## 1. 工作原理

➤ 单向导电性功能，即整流效应。

**正偏时：** 外加电场与内建电场方向**相反**，削弱对扩散电流的遏制作用，大量扩散电流源源不断通过PN结，**正向电流很大**。

**反偏时：** 外加电场与内建电场方向**相同**，漂移运动加强，**反向电流很小**。



# 1) PN结功率二极管

## 2. 二极管的反向偏置

### ➤ 二极管的反向漏电流

功率二极管具有反向阻断能力，阻断电压从数伏到数千伏。

功率二极管的反向电流主要由空间电荷区的产生电流和扩散电流构成。

较低反向电压下，二极管的反向电流趋于饱和数值很低。

扩散电流常温下不构成漏电流的主要成分，温度高时为主要成分。

常温下二极管的漏电流主要是空间电荷区产生电流。

# 1) PN结功率二极管

## 2. 二极管的反向偏置

### ➤ 雪崩击穿

外加电压高时，在空间电荷区产生新的电子-空穴对。

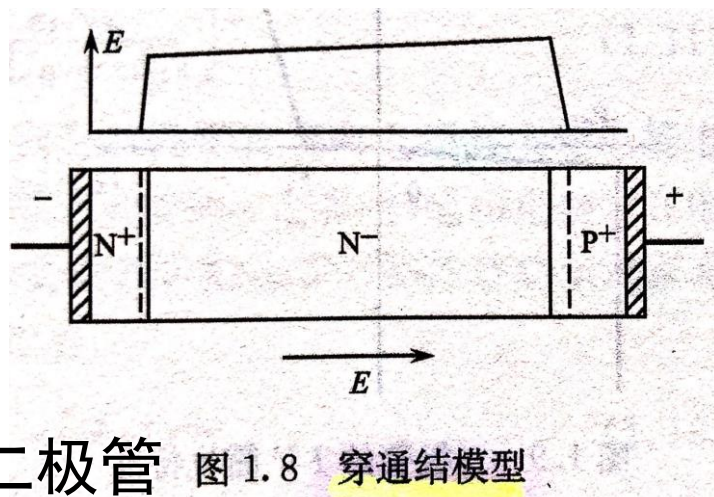
当倍增因子的数值接近1时，漏电流显著增大，达到1时，漏电流趋近于无穷大，表现为**击穿现象**。

### ➤ 穿通结

$N^+$ 提高器件耐压能力， $N^-$ 降低漏电流

采用穿通结结构的二极管，

中间层可作为本征半导体，称为PIN二极管



# 1) PN结功率二极管

## 3. 二极管的正向偏置

### ➤ 具有单向导电性

正偏时：降低势垒，二极管导通，通态压降1伏左右。

反偏时：在达到击穿电压前，仅有很小的反向漏电流流过。

在达到击穿电压后，反向电流急剧增加。

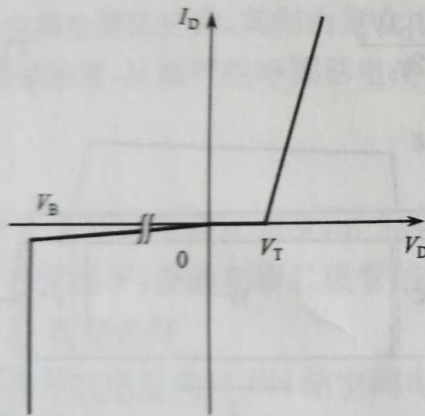


图 1.9 二极管的  $I$ - $V$  简化特性

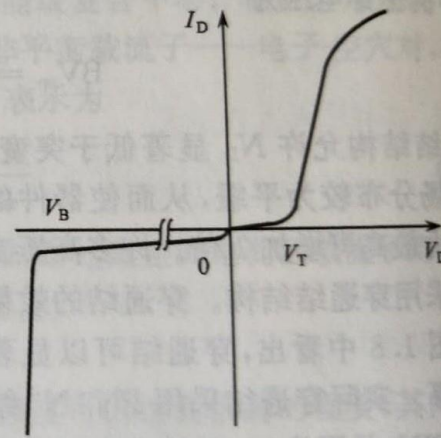


图 1.10 二极管的  $I$ - $V$  实际特性

# 1) PN结功率二极管



## 4. 动态特性之二极管的结电容

- 二极管的PN区两边存在电荷随电压的改变而改变，二极管具有一定的PN结电容。
- 器件的结电容分为势垒电容和扩散电容。
- 势垒电容仅在反偏时有一定影响，扩散电容在正向偏置时对器件的动态过程有重要影响。



# 1) PN结功率二极管

## 4. 动态特性之开通过程

- PN结的空间电荷区随外电压下降而收缩，既势垒电容放电。迅速完成。
- 在电中性区建立足够载流子分布梯度，既扩散电容充电。有一定延迟时间。

开通过程先是电压快速下降，  
然后逐渐下降到一定稳定值。

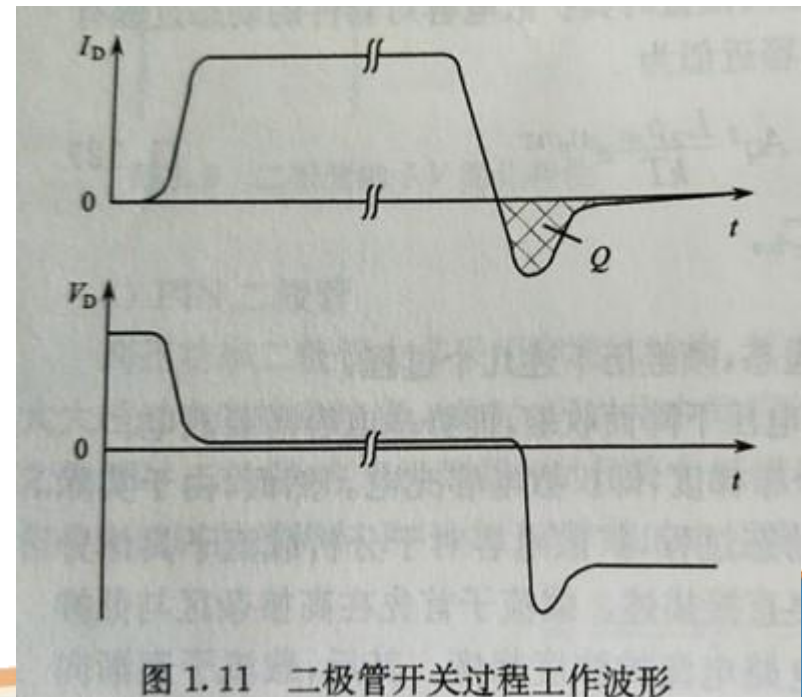


图 1.11 二极管开关过程工作波形

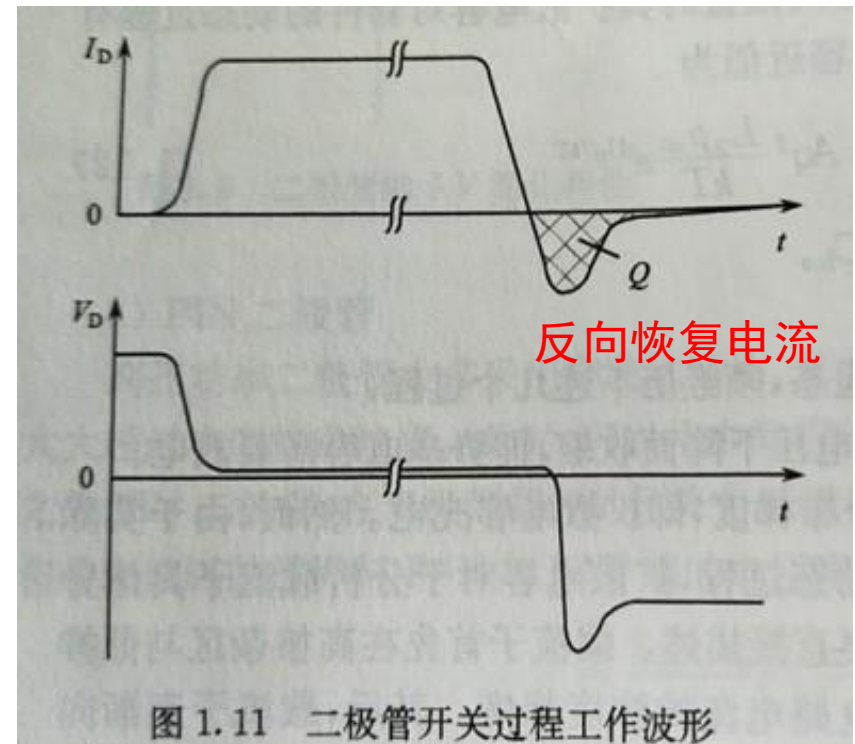
# 1) PN结功率二极管

## 3. 动态特性之关断过程

外电路作用下，二极管电流反向流动。

关断过程如下：

- 反向电流在PN结界附近建立浓度梯度。二极管依然正偏。
- 边界附近将建立势垒区。
- 势垒区扩展到足以抵抗外电压的宽度，反压建立与反向电流逐渐衰减，器件呈高阻状态。



## 4. 应用特点

- **损耗**：通态损耗与电压降相关；阻断损耗占比小可忽略。
- **电压与电流耐量**：
  - 二极管外加反向电压达到或超过击穿电压时，会使器件永久失效。
  - 不要让二极管通过过高的**峰值电流**。
  - 常用功率二极管电压耐量从数十伏至数千伏，电流容量从数安培至数千安培。

# 1) PN结功率二极管

## 4. 应用特点

### ➤ 开关速度：

- ◆ **器件关断时间**：数微秒（普通功率二极管）、微妙（快速二极管）、百纳秒（超快速二极管）。
- ◆ 二极管关断时间与器件参数与负载条件有关。电感性负载，需承受较高的峰值电压。
- ◆ 低压器件具有较高速度

### ➤ 串联与并联：

- ◆ 串联的问题是均压，主要考虑断态（漏电阻差异）
- ◆ 并联的问题是工作电流的不均匀分配。（负温度特性）

## 2) 肖特基功率二极管

### 1. 结构

- 利用**金属与半导体之间的势垒**制成的二极管

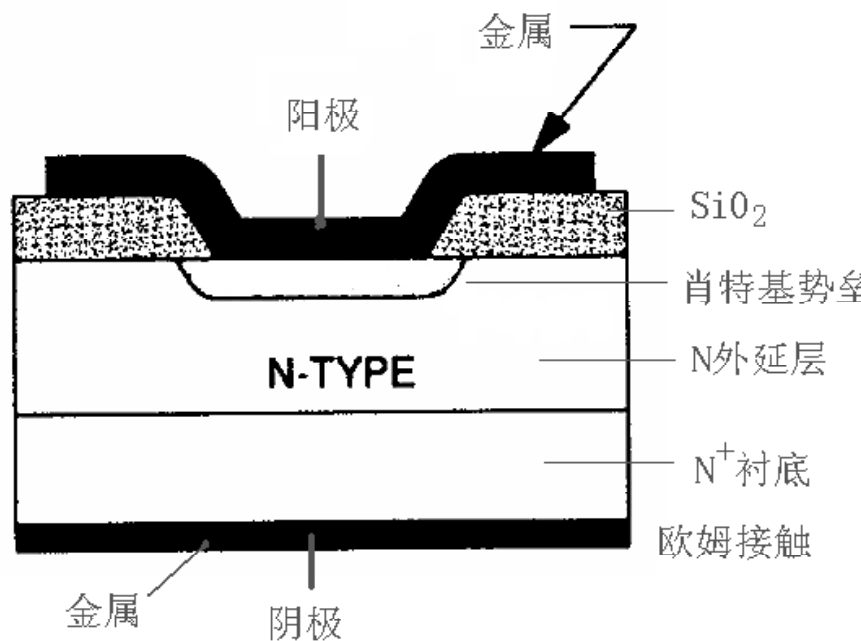
### 2. 工作原理

加反向电压时呈现出很高的阻抗，

仅有较小漏电流

加正向电压，导通产生正向电流。

**与PN结不同，仅有多数载流子（电子）参与，没有少数载流子。**



肖特基功率二极管结构图

## 2) 肖特基功率二极管



### 3. 外特性

- 低导通电压(0.3V)
- 反向漏电流大，阻断电压低
- 开通速度快，没有明显的反向恢复过程

### 4. 应用

- 反向电压耐量在60V以内，工作温度较低，适合于**高频低压**应用

# 1.4 电力晶体管

- 电力晶体管，也称双极型功率晶体管
- GTR: Giant Transistor
- 由三层半导体（组成两个PN结）构成
- 一般为NPN结构，PNP结构耐压低

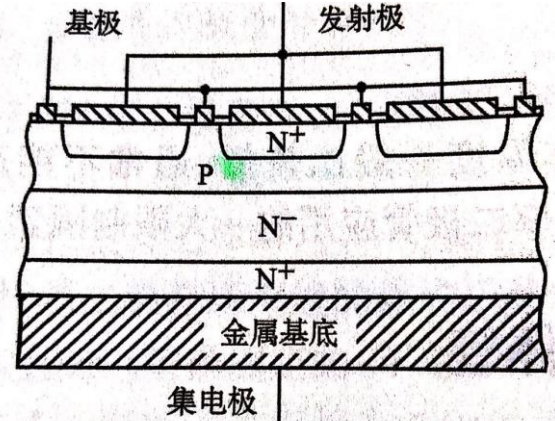


图 1.18 电力晶体管的结构

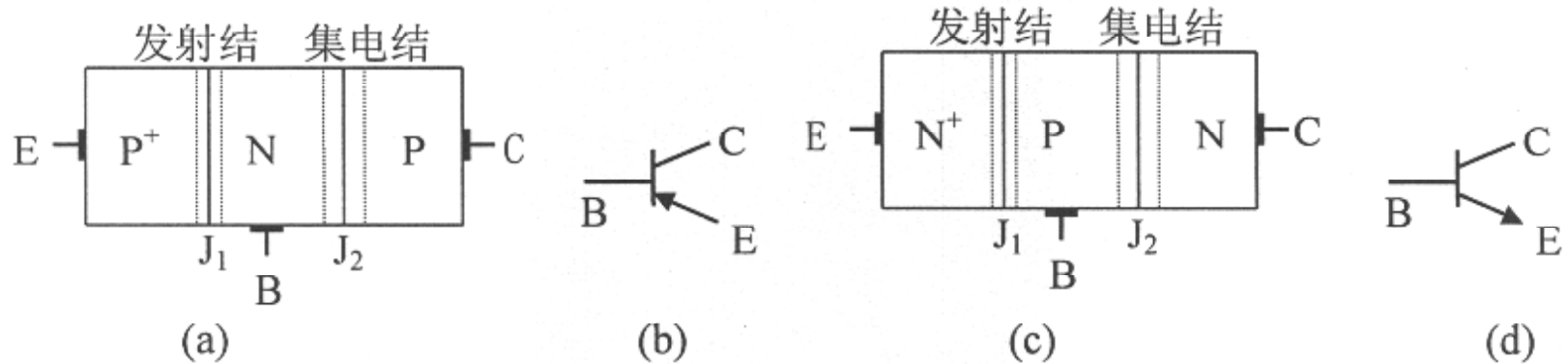


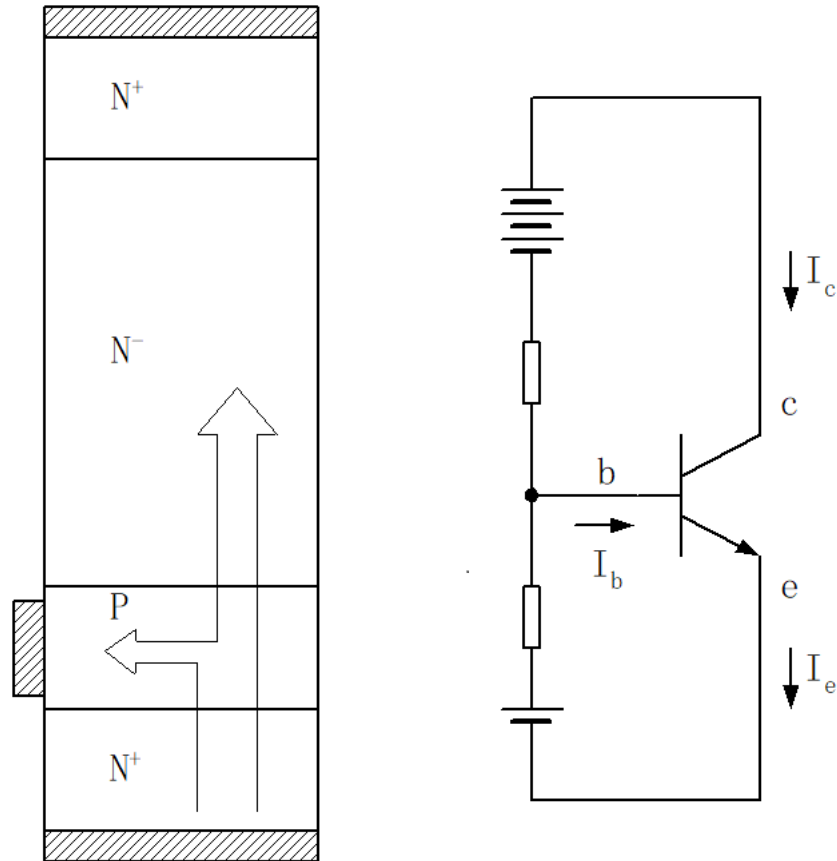
图 1—8: 晶体管的结构及电路图中的符号

(a) PNP 结构; (b) PNP 符号; (c) NPN 结构; (d) NPN 符号



## 1.4 电力晶体管

### GTR工作原理



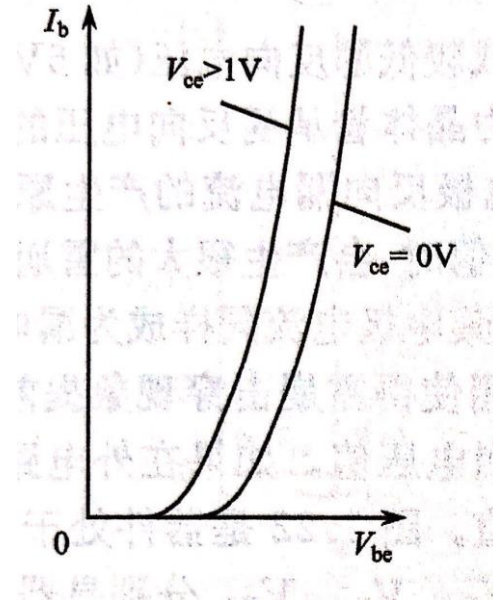


## 1.4 电力晶体管

### GTR静态特性

#### ➤ 输入特性

在同样的基极电流下由于集电结的作用，基极不容易堆积载流子，从而使发射结电压低于单独工作的二极管电压。

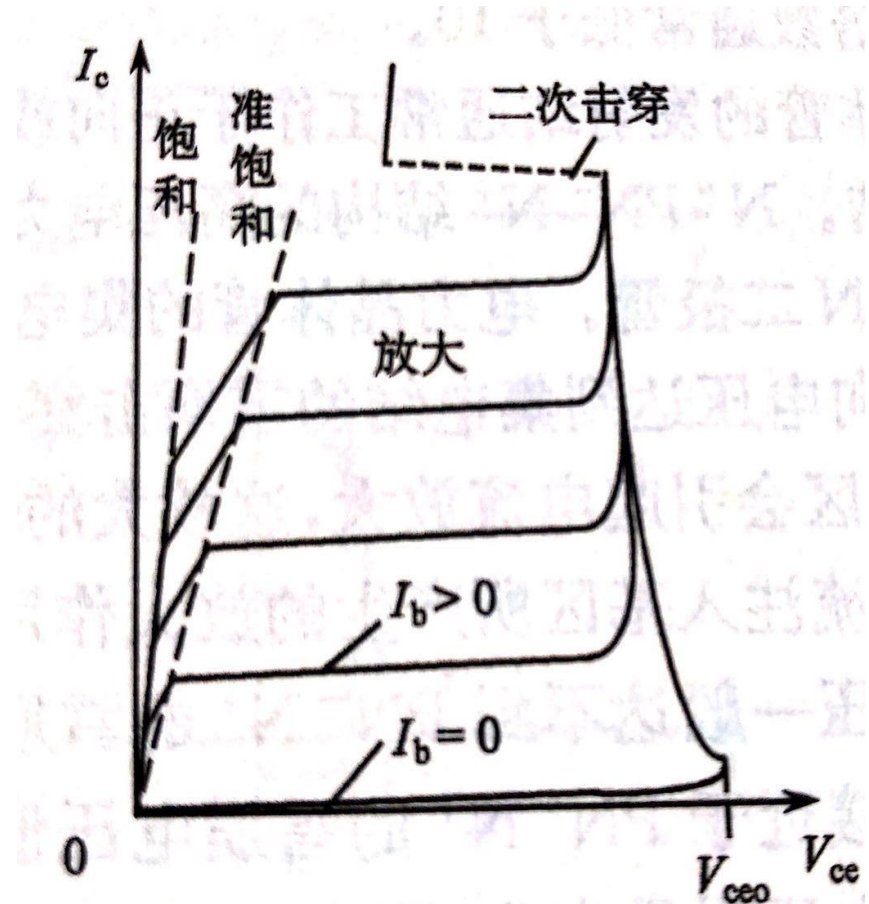


## 1.4 电力晶体管

### 放大区



在保持一定基极电流条件下  
集电极电流变化不大。



## 1.4 电力晶体管

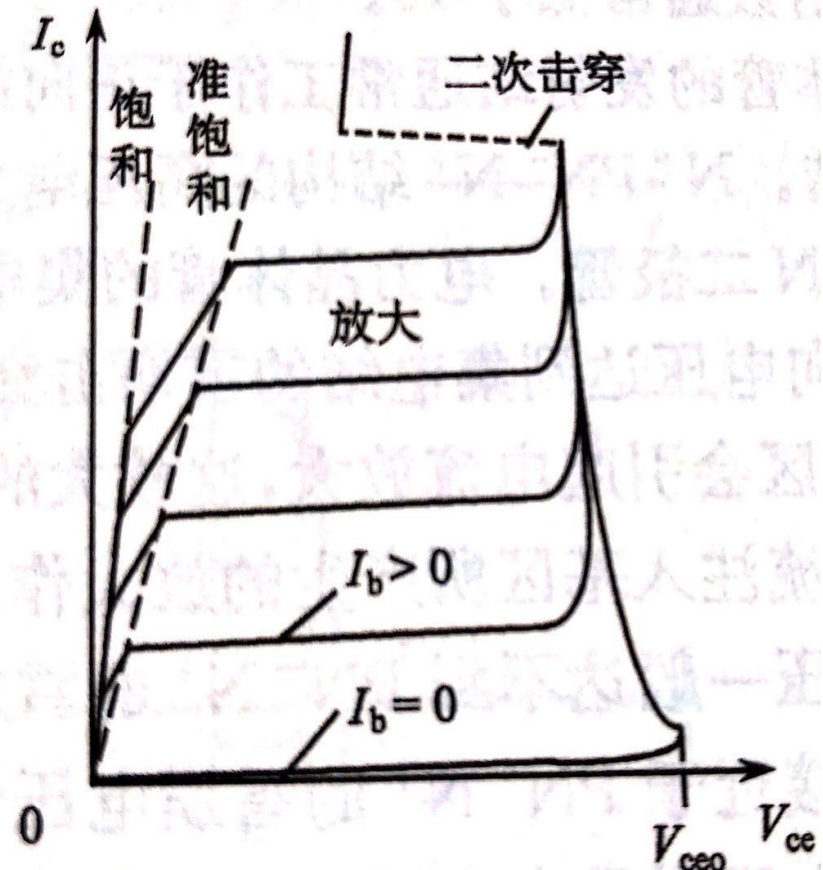
### 截止区

- 又称阻断区
- $i_B = 0$
- 开关处于断态
- GTR承受高电压

而仅有极小的漏电流存在

- 集电结反偏 $U_{BC} < 0$ ，发射结反偏 $U_{BE} < 0$ ；

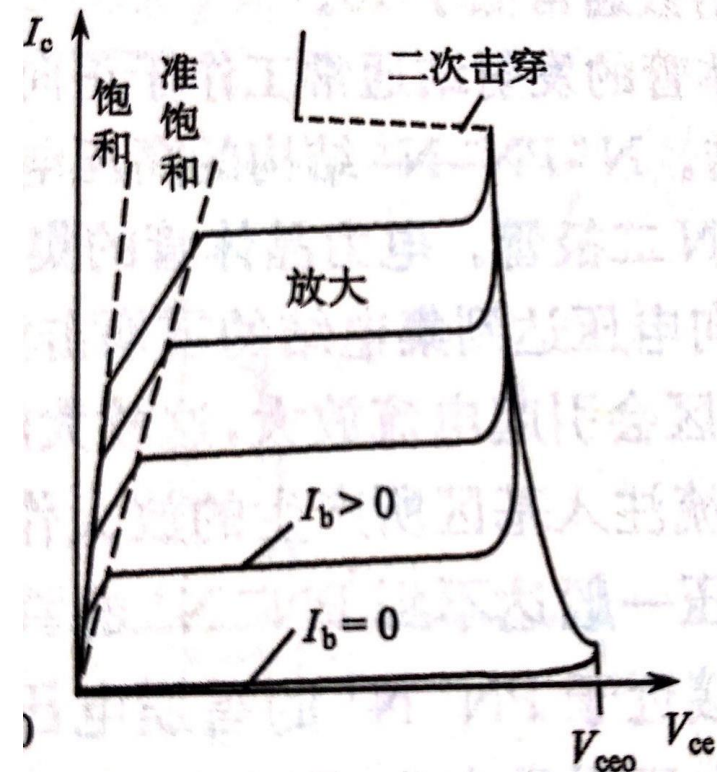
或集电结反偏 $U_{BC} < 0$ ，发射结偏压为零 $U_{BE} = 0$ 。



## 1.4 电力晶体管

### 放大区（有源区或线性区）

- 集电结加反向电压，
- 集电极电流对基极电流具有放大作用
- $i_c$ 与 $i_b$ 之间呈线性关系，  
特性曲线近似平直。
- $U_{BC} < 0$ ,  $U_{BE} > 0$
- 对于工作于开关状态的GTR来说，应当尽量避免工作于有源区，否则功耗很大，要快速通过放大区，实现截止与饱和之间的状态转换。

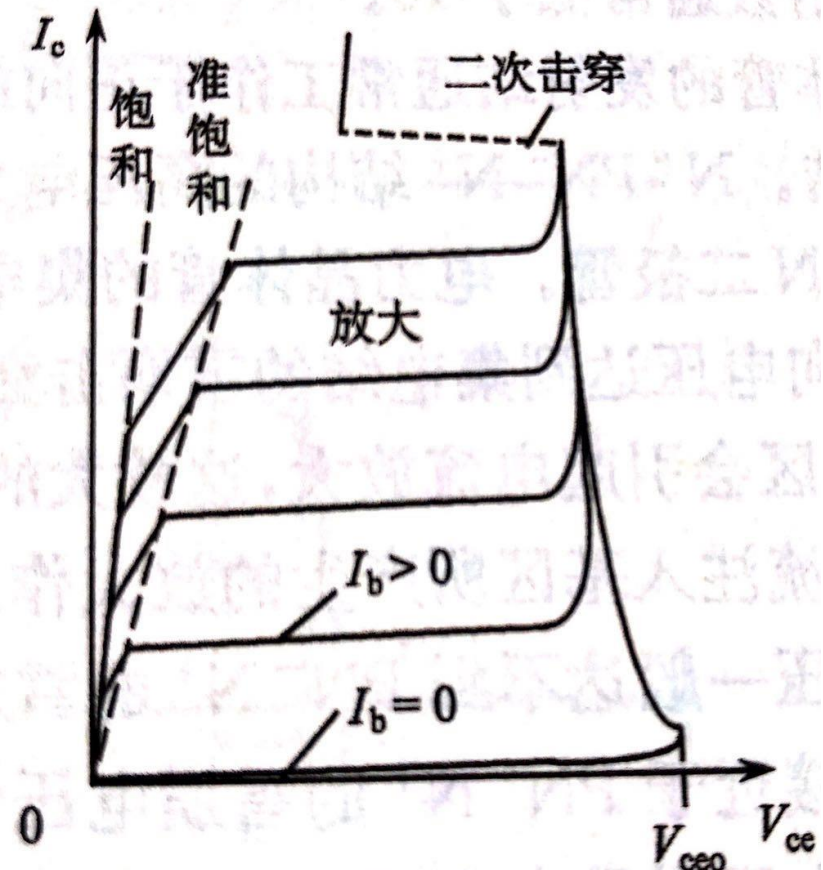




## 1.4 电力晶体管

### 饱和区

- 开关处于通态
- 集电极电流与集电极反向电压成正比，基区载流子注入不能增加集电极电流。
- $i_B$ 变化时， $i_C$ 不再随之变化
- 导通电压和电流增益均很小
- $U_{BC} > 0$ ,  $U_{BE} > 0$



## 1.4 电力晶体管

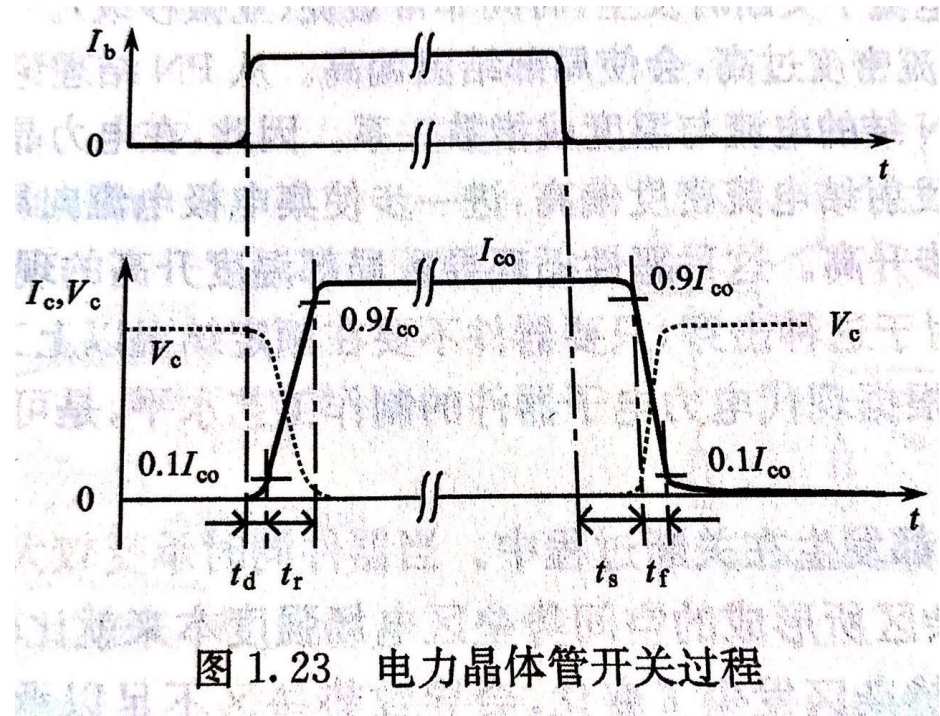
### 准饱和区

- 指有源区与饱和区之间的一段区域，即特性曲线明显弯曲的部分
- 随 $i_B$ 增加，开始出现基区宽度调制效应，电流增益开始下降
- $i_C$ 与 $i_B$ 之间不再呈线性关系
- $U_{BC} < 0$ ,  $U_{BE} > 0$

## 1.4 电力晶体管

### GTR动态特性-开通

- 基极加正向电流时，需要对发射结垒势电容充电→开通延迟 $t_d$
- 载流子逐渐在基区建立指向集电结的浓度梯度，集电流上升→开通电流上升时间 $t_r$
- 总开通时间  $t_{on}=t_d+t_r$



# 1.4 电力晶体管

## GTR动态特性-关断

- 关断信号加上，基区和集电区的部分退饱和→关断延迟  $t_s$
- 抽取基区载流子，集电结反偏，集电流下降至较小值→关断下降时间  $t_f$
- 基区载流子逐渐消耗，发射极反偏，集电极电流衰减至静态漏电流→关断尾部时间  $t_{tl}$
- 总关断时间  $t_{off} = t_s + t_f + t_{tl}$

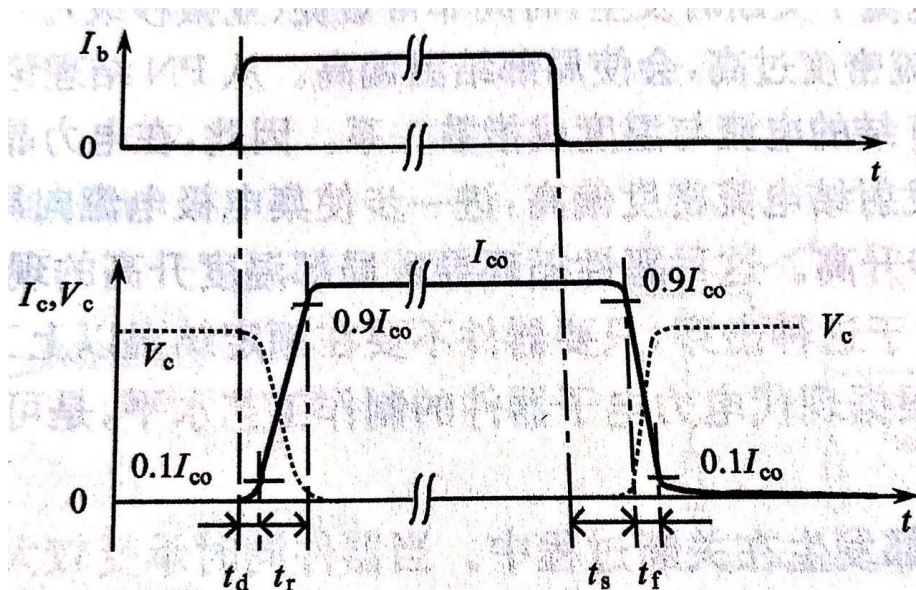


图 1.23 电力晶体管开关过程



## 1.4 电力晶体管

### 击穿与二次击穿

- **器件过热**

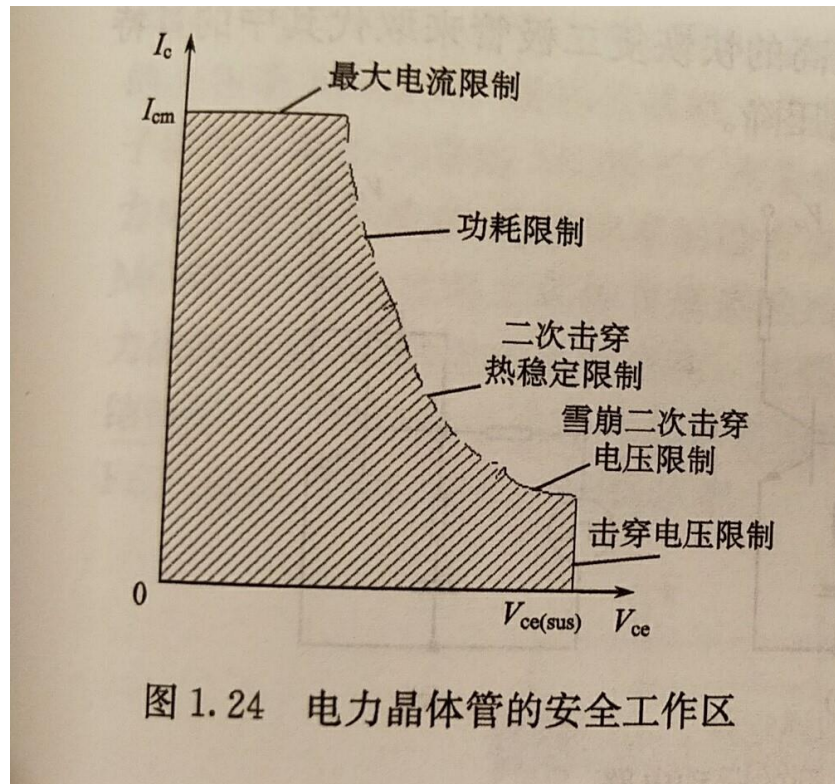
不在额定结温以上工作

- **二次击穿**

当器件同时承受大电流和高电压时，关断过程中电流分布不均匀，局部耐压下降，造成雪崩型二次击穿

## 1.4 电力晶体管

### GTR安全工作区



## 1.4 电力晶体管

### GTR特点

- 电流驱动型、双极型、全控型器件
- 所需驱动功率大
- 通态饱和电压低（由于电导调制作用）
- 适用于要求不高的低速开关，高功率的线性电路