



第2章 电力电子器件

Chapter 2: Power Electronic Devices

2.1 电力电子器件概述

2.2 不可控器件——电力二极管

2.3 半控型器件——晶闸管

2.4 典型全控型器件

2.5 其他新型电力电子器件

2.6 功率集成电路与集成电力电子模块

本章小结



本章内容和学习要点

■ 本章内容

- ◆ 按照不可控器件、半控型器件、典型全控型器件和其它新型器件的顺序，分别介绍各种电力电子器件的**工作原理、基本特性、主要参数**以及选择和使用中应注意的一些问题。

■ 学习要点

- ◆ 最重要的是掌握其**基本特性**。
- ◆ 掌握电力电子器件的**型号命名法**，以及其**参数和特性曲线**的使用方法。
- ◆ 了解电力电子器件的**半导体物理结构**和**基本工作原理**。
- ◆ 了解某些主电路中对其它电路元件的特殊要求。



第2章 电力电子器件

Chapter 2: Power Electronic Devices

2.1 电力电子器件概述

2.2 不可控器件——电力二极管

2.3 半控型器件——晶闸管

2.4 典型全控型器件

2.5 其他新型电力电子器件

2.6 功率集成电路与集成电力电子模块

本章小结



2.1 电力电子器件概述

2.1.1 电力电子器件的概念和特征

2.1.2 应用电力电子器件的系统组成

2.1.3 电力电子器件的分类(考点)

2.1.4 本章内容和学习要点



2.1 电力电子器件概述

2.1.1 电力电子器件的概念和特征

2.1.2 应用电力电子器件的系统组成

2.1.3 电力电子器件的分类(考点)

2.1.4 本章内容和学习要点



2.1.1 电力电子器件的概念和特征

■ 电力电子器件的概念

◆ 电力电子器件：可直接用于处理电能的主电路中，实现电能的变换或控制的电子器件。

👉 主电路(Main Circuit)：在电气设备或电力系统中，直接承担电能的变换或控制任务的电路。

👉 电力电子器件可分为电真空器件和半导体器件两类，目前往往专指电力半导体器件。



2.1.1 电力电子器件的概念和特征

■ 电力电子器件的特征

- 所能处理电功率的大小，也就是其承受电压和电流的能力，是其最重要的参数，一般都远大于处理信息的电子器件。
- 为了减小本身的损耗，提高效率，一般都工作在开关状态。
- 由信息电子电路来控制，而且需要驱动电路。
- 自身的功率损耗通常仍远大于信息电子器件，在其工作时一般都需要安装散热器。

2.1.1 电力电子器件的概念和特征



Px120



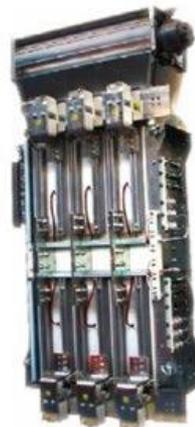
P3



P16



P1



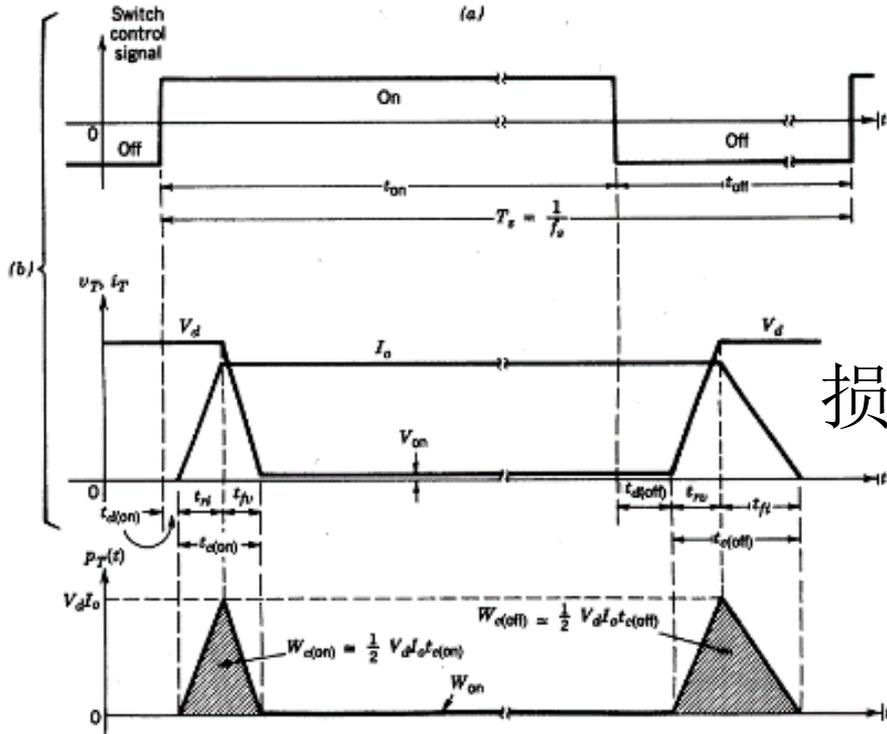
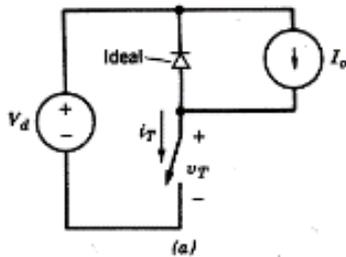
N4



P11

2.1.1 电力电子器件的概念和特征

■ 电力电子器件的 功率损耗



通态损耗 $V_{on} \times I_o$

断态损耗 $V_{off} \times I_{leak}$

开关损耗 {
 开通损耗 W_{on}
 关断损耗 W_{off}



2.1 电力电子器件概述

2.1.1 电力电子器件的概念和特征

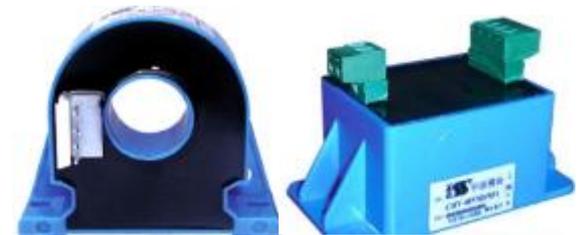
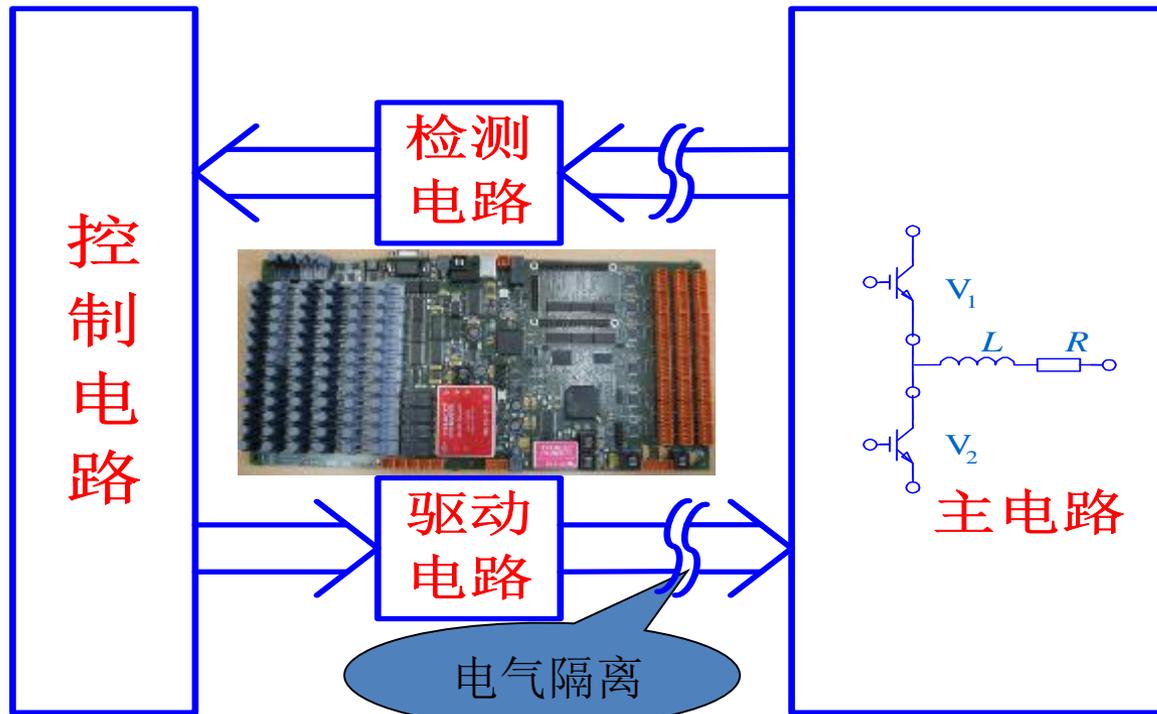
2.1.2 应用电力电子器件的系统组成

2.1.3 电力电子器件的分类(考点)

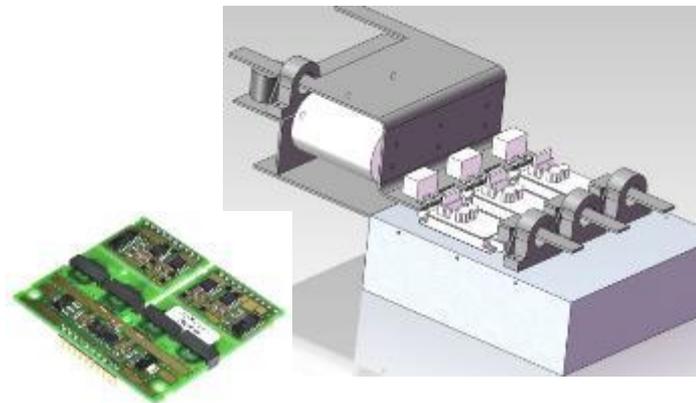
2.1.4 本章内容和学习要点

2.1.2 应用电力电子器件的系统组成

■ 电力电子器件在实际应用中，一般是由控制电路、驱动电路和以电力电子器件为核心的主电路组成一个系统。



HALL电流、电压传感器



电力电子器件在实际应用中的系统组成



2.1 电力电子器件概述

2.1.1 电力电子器件的概念和特征

2.1.2 应用电力电子器件的系统组成

2.1.3 电力电子器件的分类(考点)

2.1.4 本章内容和学习要点



2.1.3 电力电子器件的分类

■ 按照能够被控制电路信号所控制的程度

➤ **不可控器件** 不能用控制信号来控制其通断。

电力二极管 (Power Diode)

➤ **半控型器件** 通过控制信号可以控制其导通，器件的关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

{ **晶闸管 (Thyristor, Silicon Controlled Rectifier, SCR)**
及其大部分派生器件



2.1.3 电力电子器件的分类

■ 按照能够被控制电路信号所控制的程度

➤ 全控型器件

通过控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断。

绝缘栅双极性晶体管

(Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT)

电力场效应晶体管 (Power MOSFET)



2.1.3 电力电子器件的分类

■ 按照驱动信号的性质

◆ **电流驱动型** **SCR, GTO, GTR**

通过从控制端注入或者抽出**电流**来实现导通或者关断的控制。

◆ **电压驱动型** **电力MOSFET, IGBT**

仅通过在控制端和公共端之间施加一定的**电压**信号就可实现导通或者关断的控制。



2.1.3 电力电子器件的分类

■ 按照驱动信号的波形

◆ 脉冲触发型 **SCR, GTO**

通过在控制端施加一个电压或电流的**脉冲**信号来实现器件的开通或者关断的控制。

◆ 电平控制型 **GTR, 电力MOSFET, IGBT 等**

必须通过**持续**在控制端和公共端之间施加一定电平的电压或电流信号使器件开通并**维持**在导通状态或者关断并维持在阻断状态。



2.1.3 电力电子器件的分类

■ 按照载流子参与导电的情况

◆ 单极型器件 电力MOSFET, Schottky 二极管

多子(Majority)器件，由一种载流子(carrier)参与导电。

◆ 双极型器件 功率二极管、SCR, GTO, GTR

少子(Minority)器件，由电子和空穴两种载流子参与导电。

◆ 复合型器件 IGBT

单极型器件和双极型器件集成混合而成，也称混合型器件。



第2章 电力电子器件

Chapter 2: Power Electronic Devices

2.1 电力电子器件概述

2.2 不可控器件——电力二极管

2.3 半控型器件——晶闸管

2.4 典型全控型器件

2.5 其他新型电力电子器件

2.6 功率集成电路与集成电力电子模块

本章小结



2.2 不可控器件——电力二极管

- **电力二极管 (Power Diode)** 自20世纪50年代初期就获得应用，其结构和原理简单，工作可靠，直到现在电力二极管仍然大量应用于许多电气设备当中。

Semiconductor Rectifier, SR 取代**汞弧整流器**

- 在采用全控型器件的电路中电力二极管往往是**不可缺少的**，特别是开通和关断速度很快的**快恢复二极管**和**肖特基二极管**，具有不可替代的地位。

续流，钳位



电力电子器件四种分类：
不控器件；
双极型器件（肖特基二极管除外）。



2.2 不可控器件——电力二极管

2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

2.2.2 电力二极管的基本特性

2.2.3 电力二极管的主要参数

2.2.4 电力二极管的主要类型



2.2 不可控器件——电力二极管

2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

2.2.2 电力二极管的基本特性

2.2.3 电力二极管的主要参数

2.2.4 电力二极管的主要类型

2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

- **基本结构和工作原理**与信息电子电路中的二极管一样。
- 电力二极管是以**半导体PN结为基础**的，实际上是由一个**面积较大**的PN结和两端引线以及封装组成的。
- 从外形上看，可以有**螺栓型**、**平板型**等多种封装。

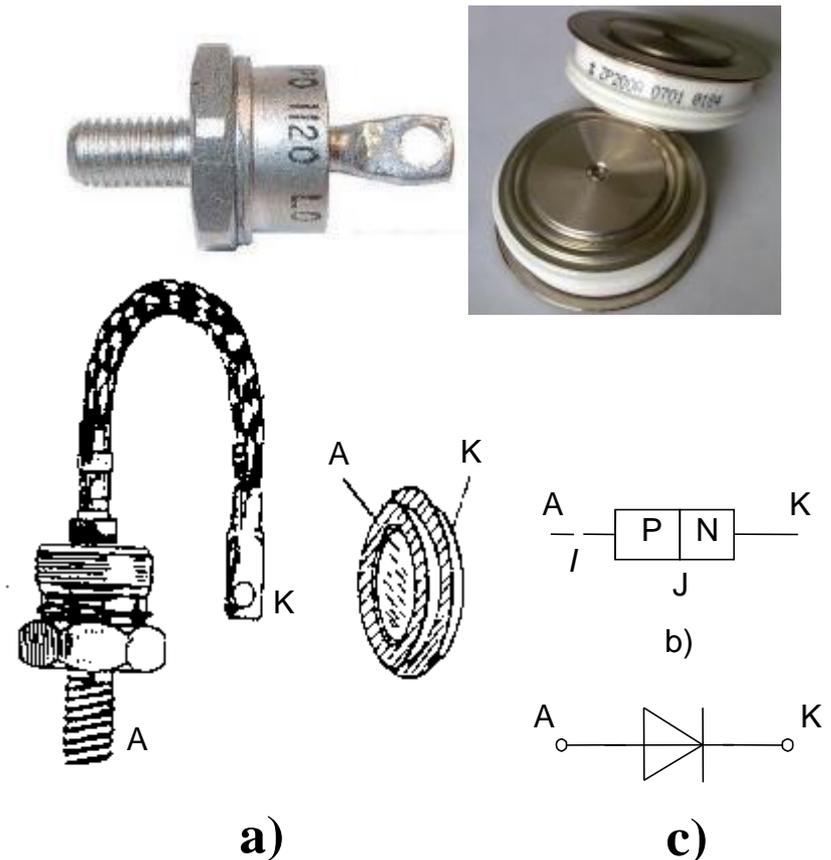


图2-2 电力二极管的外形、结构和电气图形符号
a) 外形 b) 基本结构 c) 电气图形符号

2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

□PN结

基本概念

扩散运动--多子
 漂移运动--少子

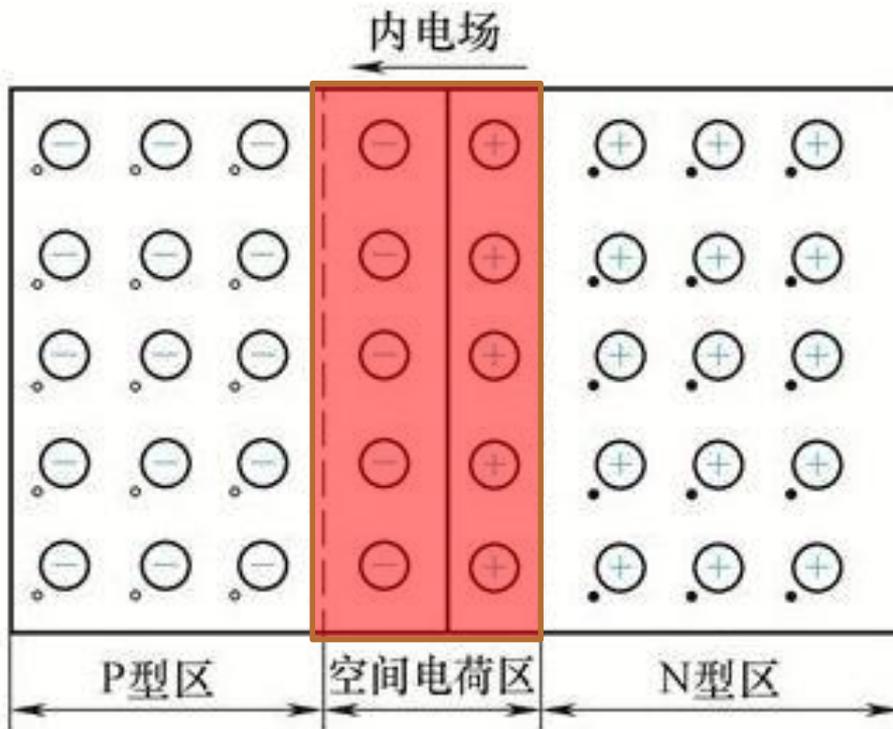


图2-3 PN结的形成

↓ 自建电场

空间电荷区、耗尽层、
 阻挡层、势垒区

单向导电性

外加正向电压 → 与自建电场反向、空间电荷区变窄、扩散 > 漂移 → 正向电流，导通状态

外加反向电压 → 与自建电场同向、空间电荷区变宽、扩散 < 漂移 → 反向饱和电流，截止状态

2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

□ 电力二极管与信息电子中普通二极管区别

➤ 垂直导电结构

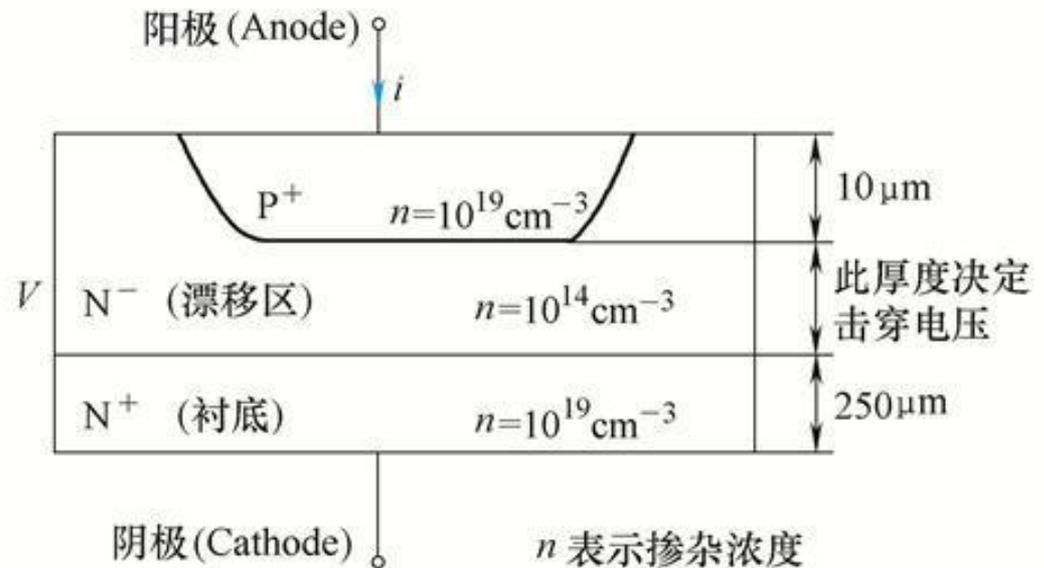
✓ 提高二极管通流能力

➤ P-i-N结构

✓ 提高二极管反向耐压

➤ 电导调制效应

✓ 降低二极管通态压降



(原因: 正向电流小时, 二极管电阻主要由漂移区N-欧姆电阻决定; 正向电流较大时, P区注入漂移区N-的少子空穴增多, N-的多子也相应增加。从而载流子浓度增加, 降低导通电阻。)



2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

□PN结的**反向击穿**（两种形式）

- ◆ **雪崩击穿**：反向电压足够高→内建电场较强→漂移运动载流子加速→**碰撞产生新电子空穴对**→连锁反应→载流子倍增→（滚雪球）雪崩击穿
- ◆ **齐纳击穿**：高掺杂浓度半导体→加不大反向电压→内建电场很强→**价电子直接拉出共价键，产生新电子空穴对**→反向电流剧增→齐纳击穿(齐纳稳压管)
- ◆ 均可能导致热击穿



2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

□PN结的电容效应

- 称为结电容 C_J ，又称为微分电容。
- 按其产生机制和作用的差别分为势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 。
 - 势垒电容只在外加电压变化时才起作用，外加电压频率越高，势垒电容作用越明显。
 - 扩散电容仅在正向偏置时起作用。在正向偏置时，当正向电压较低时，势垒电容为主。正向电压较高时，扩散电容为结电容主要成分。
 - 结电容影响PN结的工作频率，特别是在高速开关的状态下，可能使其单向导电性变差，甚至不能工作。



2.2 不可控器件——电力二极管

2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

2.2.2 电力二极管的基本特性

2.2.3 电力二极管的主要参数

2.2.4 电力二极管的主要类型

2.2.2 电力二极管的基本特性

□ 静态特性--伏安特性

- 正向电压大到一定值（**门槛电压** U_{TO} ），正向电流才开始明显增加，处于稳定**导通状态**。
- 与 I_F 对应的电力二极管两端的电压即为其**正向电压降** U_F 。
- 承受反向电压时，只有**少子**引起的微小而数值恒定的**反向漏电流**。

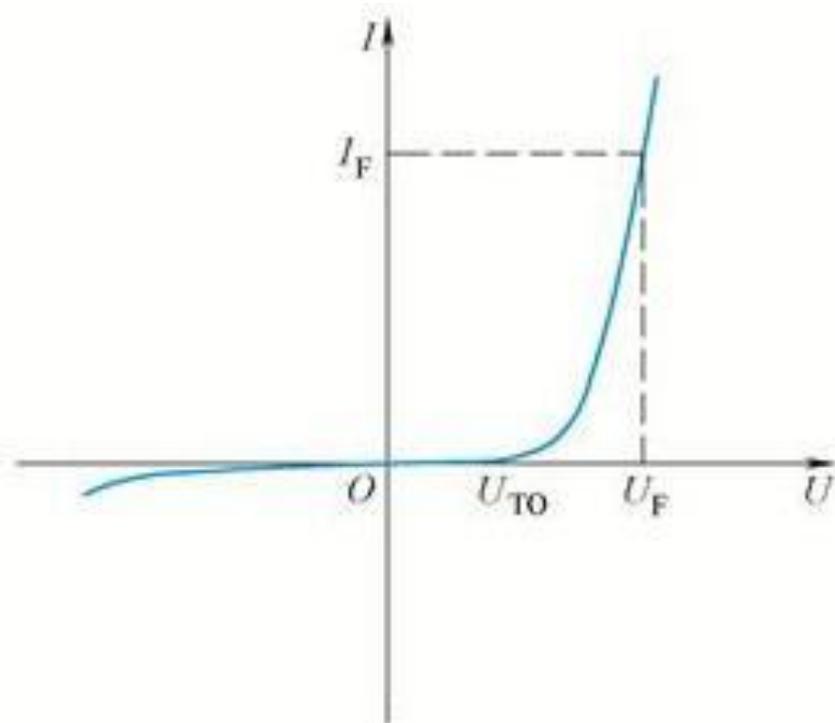
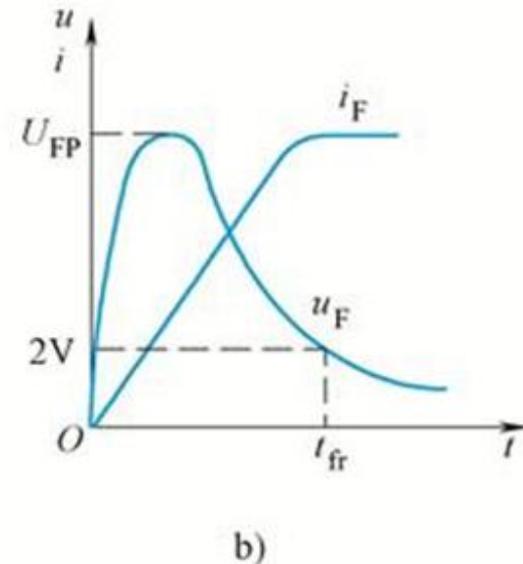
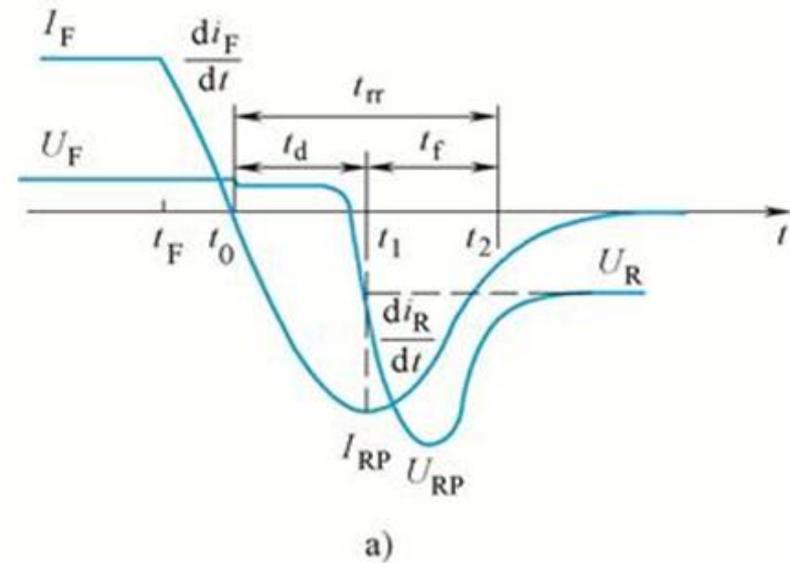


图2-5 电力二极管的伏安特性

2.2.2 电力二极管的基本特性

□ 动态特性

- 定义：二极管的电压--电流特性是随时间变化。（专指反映通态和断态之间转换过程的**开关特性**）
- 因为**结电容**的存在，必然引入的过渡过程。

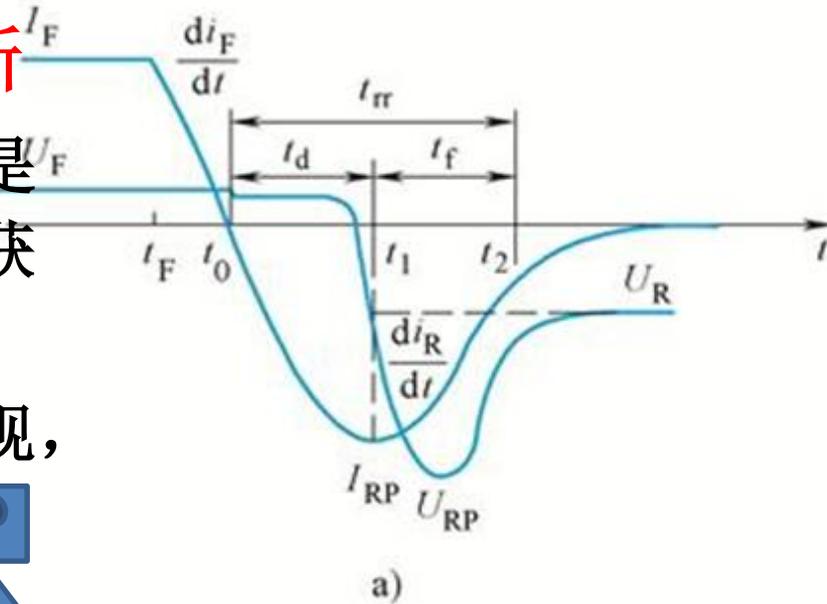


2.2.2 电力二极管的基本特性

□ 由正向转换为反向偏置 -- 关断

➤ 电力二极管并不能立即关断，而是须经过一段短暂的时间才能重新获得反向阻断能力，进入截止状态。

➤ 在关断之前有较大的反向电流出现，并伴随有明显的反向电压过冲。



延迟时间: $t_d = t_1 - t_0$

电流下降时间: $t_f = t_2 - t_1$

反向恢复时间: $t_{rr} = t_d + t_f$

恢复特性的软度: t_f / t_d , 或称恢复系数, 用 S_r 表示。

图2-6 电力二极管的动态过程波形
a) 正向偏置转换为反向偏置

在外电路电感作用下会在二极管两端产生比外加电压高的反向电压

2.2.2 电力二极管的基本特性

□ 由零偏转换为正向偏置--开通

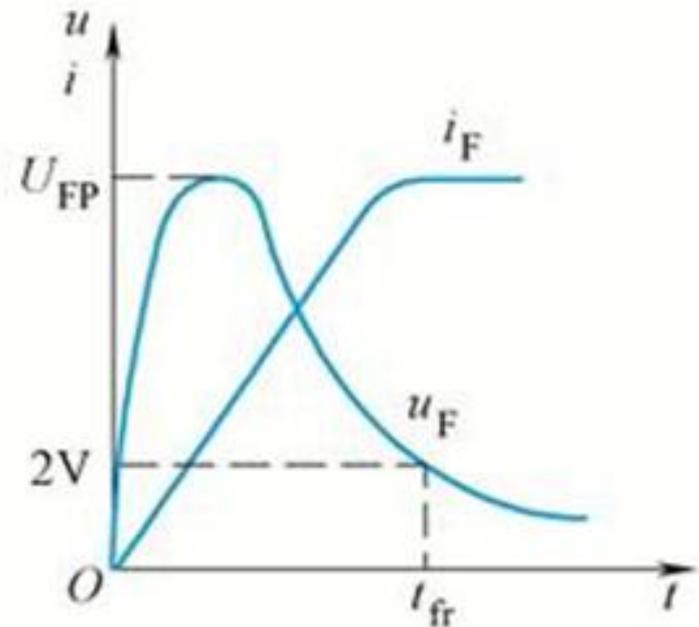
➤ 先出现一个过冲 U_{FP} ，经过一段时间才趋于接近稳态压降的某个值（如2V）。

◆ 正向恢复时间 t_{fr}

● 出现电压过冲的原因：

✓ 电导调制效应起作用所需的大量少子需要一定的时间来储存，在达到稳态导通之前管压降较大；

✓ 正向电流的上升会因器件自身的电感而产生较大压降。电流上升率越大， U_{FP} 越高。



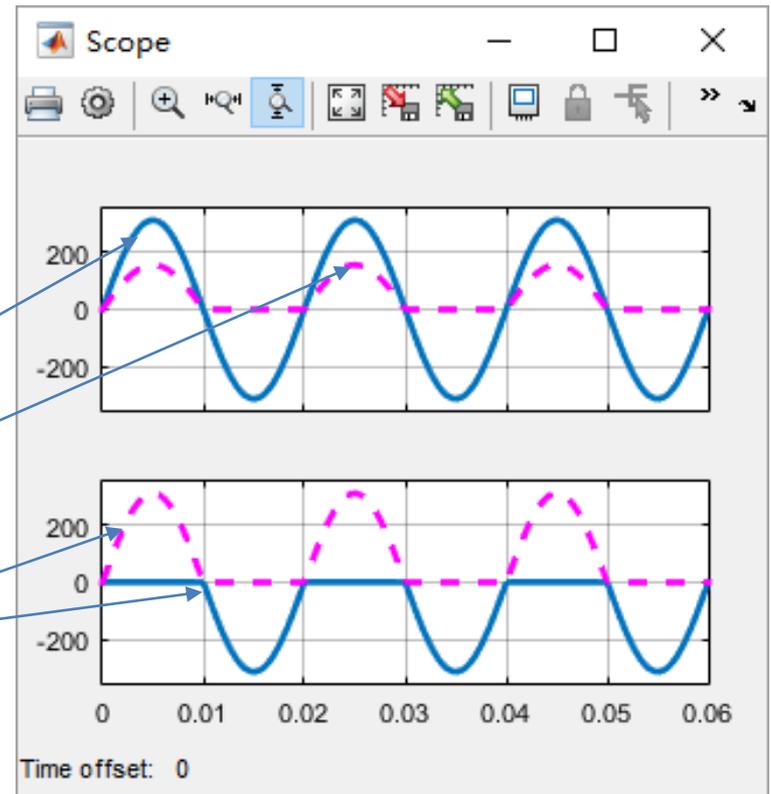
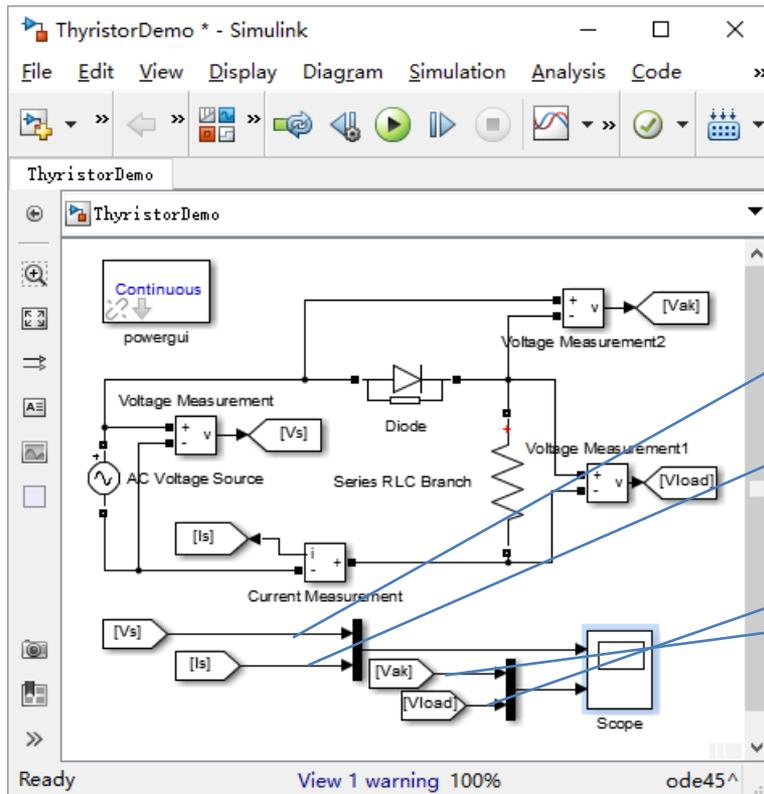
b)

图2-6 电力二极管的动态过程波形

b) 零偏置转换为正向偏置

2.2.2 电力二极管的基本特性

□ 二极管仿真



Matlab R2015a/simulink



2.2 不可控器件——电力二极管

2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

2.2.2 电力二极管的基本特性

2.2.3 电力二极管的主要参数

2.2.4 电力二极管的主要类型



2.2.3 电力二极管的主要参数

1) 正向平均电流 $I_{F(AV)}$

- 指电力二极管长期运行时，在**指定的管壳温度**（简称**壳温**，用 T_C 表示）和**散热条件**下，其允许流过的最大**工频(50Hz)正弦半波电流**的平均值。
- $I_{F(AV)}$ 是按照电流的**发热效**应来定义的，使用时应按**有效值相等**的原则来选取电流定额，并应留有一定的裕量。
- 换算关系：**正弦半波电流**的有效值 I_{Frms} 和平均值 $I_{F(AV)}$ 之比：

$$\frac{I_{Frms}}{I_{F(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$



2.2.3 电力二极管的主要参数

● 换算关系推导

$$i(t) = I_m \sin(\omega t)$$

正弦半波电流的平均值:
$$I_{F(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{\pi} I_m$$

正弦半波电流的有效值:
$$I_{Frms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin(\omega t))^2 d(\omega t)} = \frac{1}{2} I_m$$

I_{Frms} 和平均值 $I_{F(AV)}$ 之比:
$$\frac{I_{Frms}}{I_{F(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$



2.2.3 电力二极管的主要参数

2) 正向压降 U_F

- ◆ 指电力二极管在**指定温度**下，流过某一指定的**稳态正向电流**时对应的正向压降。

3) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

- ◆ 指对电力二极管所能重复施加的**反向最高峰值电压**。
- ◆ 使用时，应当留有**两倍**的裕量。



2.2.3 电力二极管的主要参数

4) 最高工作结温 T_{JM}

- ◆ 结温是指管芯PN结的平均温度，用 T_J 表示。最高工作结温是指在PN结不致损坏的前提下所能承受的**最高平均温度**。
- ◆ T_{JM} 通常在 $125\sim 175^\circ\text{C}$ 范围之内。

5) 反向恢复时间 t_{rr} : $t_{rr}=t_d+t_f$

6) 浪涌电流 I_{FSM}

- ◆ 指电力二极管所能承受最大的**连续一个或几个工频周期的过电流**。



2.2 不可控器件——电力二极管

2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

2.2.2 电力二极管的基本特性

2.2.3 电力二极管的主要参数

2.2.4 电力二极管的主要类型



2.2.4 电力二极管的主要类型

按照**正向压降**、**反向耐压**、**反向漏电流**等性能，特别是**反向恢复特性**的不同，介绍几种常用的电力二极管。

① 普通二极管（General Purpose Diode）

- 又称**整流二极管（Rectifier Diode）**，多用于**开关频率不高（1kHz以下）**的整流电路中。
- 其**反向恢复时间**较长，一般在 $5\mu\text{s}$ 以上。
- 其**正向电流定额**和**反向电压定额**可以达到很高。



2.2.4 电力二极管的主要类型

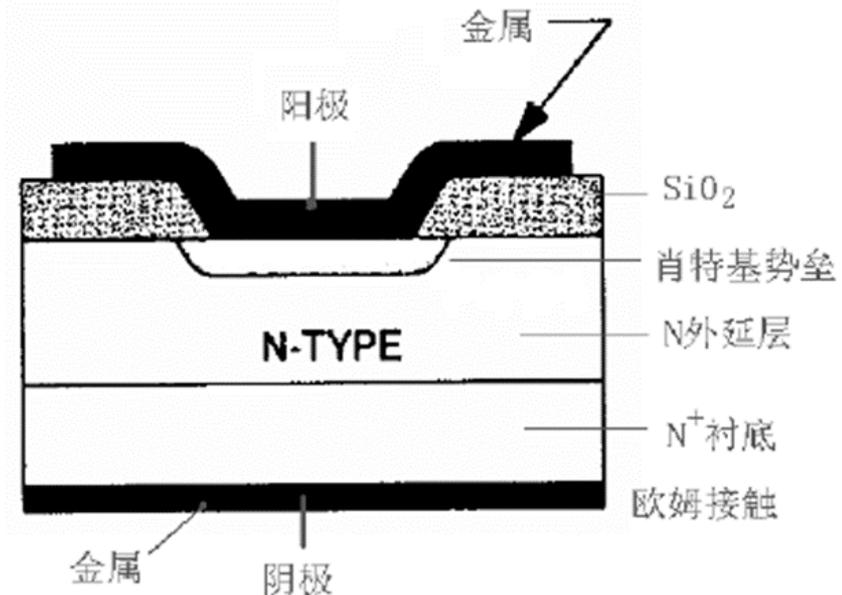
② 快恢复二极管（Fast Recovery Diode——FRD）

- 恢复过程很短，特别是**反向恢复过程**很短（一般在 $5\mu s$ 以下）。
- 快恢复外延二极管（Fast Recovery Epitaxial Diodes——FRED），采用**外延型P-i-N**结构，其反向恢复时间更短（可低于 $50ns$ ），正向压降也很低（ $0.9V$ 左右）。
- 从性能上可分为**快速恢复**和**超快速恢复**两个等级。前者反向恢复时间为数百纳秒或更长，后者则在 $100ns$ 以下，甚至达到 $20\sim 30ns$ 。

2.2.4 电力二极管的主要类型

③ 肖特基二极管 (Schottky Barrier Diode——SBD)

- 属于多子器件，单极型器件
- 优点在于：反向恢复时间很短（ $10\sim 40ns$ ），正向恢复过程中也不会有明显的电压过冲；在反向耐压较低的情况下其正向压降也很小，明显低于快恢复二极管；因此，其开关损耗和正向导通损耗都比快速二极管还要小，效率高。

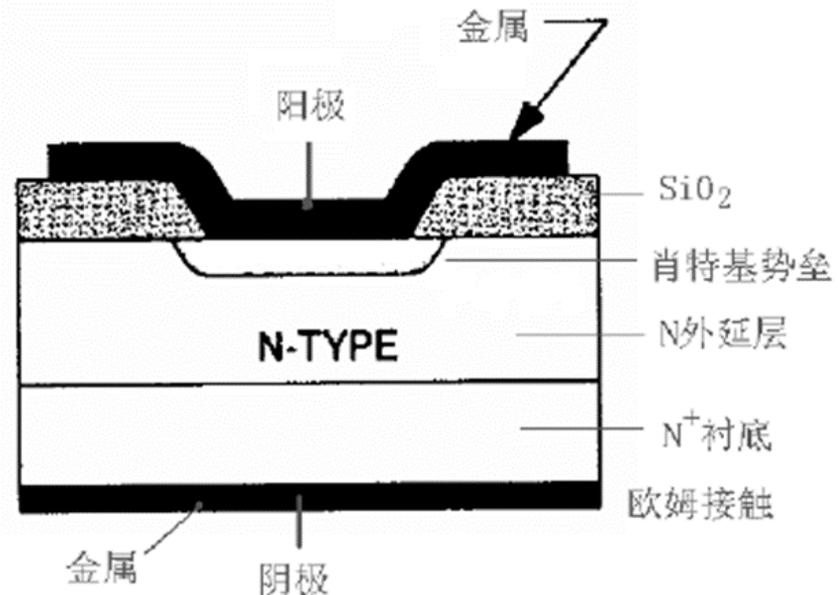


肖特基功率二极管结构图

2.2.4 电力二极管的主要类型

③ 肖特基二极管 (Schottky Barrier Diode——SBD)

➤ **弱点**在于：当所能承受的反向耐压提高时，其**正向压降**也会高得不能满足要求，因此多用于200V以下的低压场合；**反向漏电流较大**且对**温度**敏感，因此**反向稳态损耗**不能忽略，而且必须更严格地限制其工作温度。



肖特基功率二极管结构图



2.2.4 电力二极管的主要类型

类型	普通二极管	快恢复二极管	超快恢复二极管	肖特基二极管
原理	PiN结	PiN结、掺金、外延	PiN结、掺金、外延	金属与半导体接触
反向耐压	高	较高	较高	低
正向压降	高	较高	较低	低
正向电流	大	大	较大	小
反向恢复时间	>5uS	<5uS	<100ns	10~40ns



第2章 电力电子器件

Chapter 2: Power Electronic Devices

2.1 电力电子器件概述

2.2 不可控器件——电力二极管

2.3 半控型器件——晶闸管

2.4 典型全控型器件

2.5 其他新型电力电子器件

2.6 功率集成电路与集成电力电子模块

本章小结



2.3 半控型器件—晶闸管

- 晶闸管（**Thyristor**）是晶体闸流管的简称，又称作可控硅整流器（Silicon Controlled Rectifier——SCR），以前被简称为可控硅。
- 1956年美国贝尔实验室（Bell Laboratories）发明了晶闸管。
- 1957年美国通用电气公司（General Electric）开发出了世界上第一只晶闸管产品，并于1958年使其商业化。

开辟了电力电子技术迅速发展和广泛应用的崭新时代



2.3 半控型器件—晶闸管

- 20世纪80年代以来，开始被全控型器件取代。由于其能承受的电压和电流容量仍然是目前电力电子器件中最高的，而且工作可靠，因此在大容量的应用场合仍然具有比较重要的地位。

半控器件； 电流驱动型；

脉冲驱动型； 双极型器件。



2.3 半控型器件—晶闸管

2.3.1 晶闸管的结构与工作原理

2.3.2 晶闸管的基本特性

2.3.3 晶闸管的主要参数

2.3.4 晶闸管的派生器件



2.3 半控型器件—晶闸管

2.3.1 晶闸管的结构与工作原理

2.3.2 晶闸管的基本特性

2.3.3 晶闸管的主要参数

2.3.4 晶闸管的派生器件

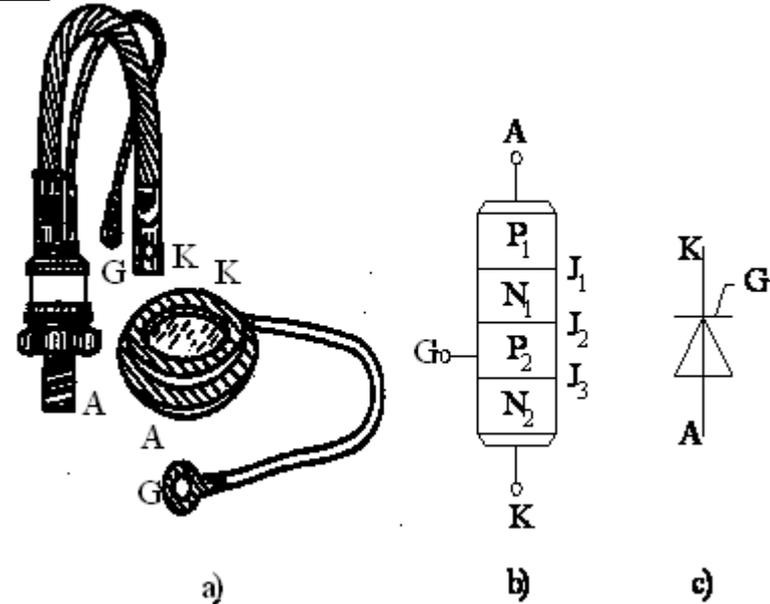
2.3.1 晶闸管的结构与工作原理

□ 晶闸管的结构

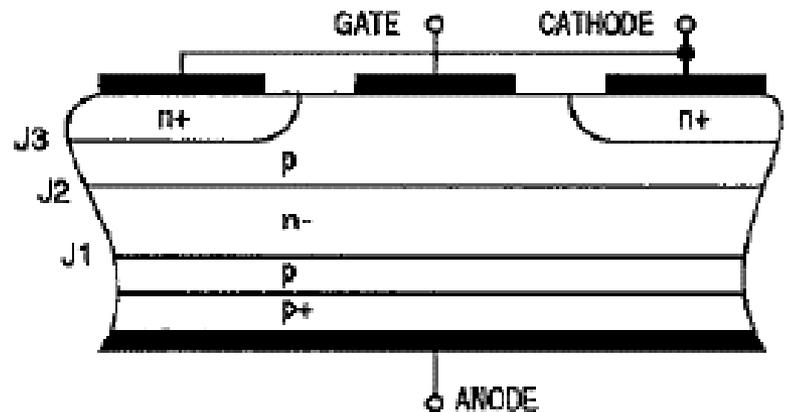
- 从外形上来看，晶闸管也主要有**螺栓型**和**平板型**两种封装结构。
- 三个联接端：**阳极A(Anode)**、**阴极K(Kathode)**和**门极（控制端）G(Gate)**。
- 内部是**PNPN 四层半导体**结构。



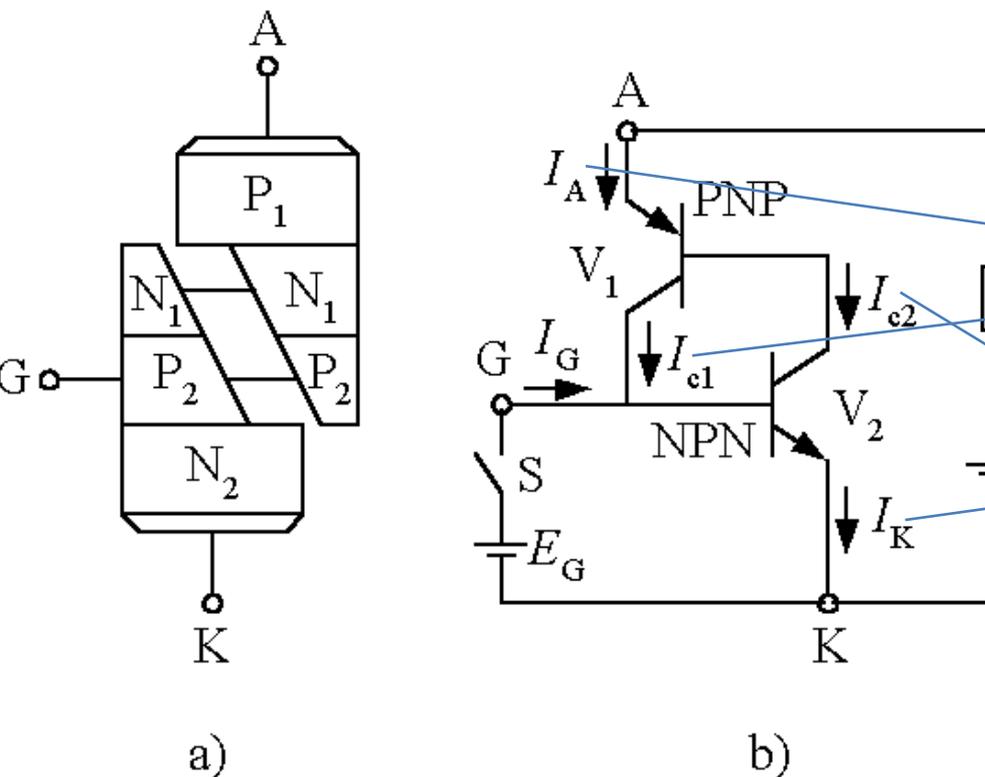
晶闸管及模块



a) 外形 b) 结构 c) 电气图形符号



2.3.1 晶闸管的结构与工作原理



晶闸管的工作原理

按照晶体管工作原理，可列出如下方程：

$$I_{c1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \quad (2-1)$$

$$I_{c2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \quad (2-2)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad (2-3)$$

$$I_A = I_{c1} + I_{c2} \quad (2-4)$$

式中， α_1 和 α_2 分别是晶体管 V_1 和 V_2 的共基极电流增益； I_{CBO1} 和 I_{CBO2} 分别是 V_1 和 V_2 的共基极漏电流。

图2-8 晶闸管的**双晶体管模型**及其工作原理

a) 双晶体管模型 b) 工作原理



2.3.1 晶闸管的结构与工作原理

由以上式 (2-1) ~ (2-4) 可得:

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2-5)$$

晶体管的特性

- 在低发射极电流下 α 是很小的，而当发射极电流建立起来之后， α 迅速增大， α 恒小于1。

阻断状态:

- $I_G = 0$ ，而 $\alpha_1 + \alpha_2$ 是很小的。由(2-5)式可看出，此时流过晶闸管的漏电流只是稍大于两个晶体管漏电流之和。

导通状态:

- 注入触发电流使各个晶体管的发射极电流增大以致 $\alpha_1 + \alpha_2$ 趋近于1的话，流过晶闸管的电流 I_A (阳极电流) 将趋近于无穷大，从而实现器件饱和导通。由于外电路负载的限制， I_A 实际上会维持有限值。



2.3.1 晶闸管的结构与工作原理

□ 其它几种可能导通的情况：

- 阳极电压升高至相当高的数值造成**雪崩效应**
- 阳极电压上升率 $\frac{du}{dt}$ **过高**
- **结温**较高
- **光触发（光电效应）**

◆ 光触发可以保证控制电路与主电路之间的**良好绝缘** 而应用于高压电力设备中，称为**光控晶闸管（Light Triggered Thyristor——LTT）**。

◆ 只有**门极触发**是**最精确、迅速而可靠**的控制手段。



2.3 半控型器件—晶闸管

2.3.1 晶闸管的结构与工作原理

2.3.2 晶闸管的基本特性

2.3.3 晶闸管的主要参数

2.3.4 晶闸管的派生器件



2.3.2 晶闸管的基本特性

□ 晶闸管正常工作时的特性

- 当晶闸管承受反向电压时，不论门极是否有触发电流，晶闸管都不会导通。
- 当晶闸管承受正向电压时，仅在门极有触发电流的情况下晶闸管才能开通。
- 晶闸管一旦导通，门极就失去控制作用，不论门极触发电流是否还存在，晶闸管都保持导通。
- 若要使已导通的晶闸管关断，只能利用外加电压和外电路的作用使流过晶闸管的电流降到接近于零的某一数值以下。

2.3.2 晶闸管的基本特性

□ 晶闸管静态特性--伏安特性

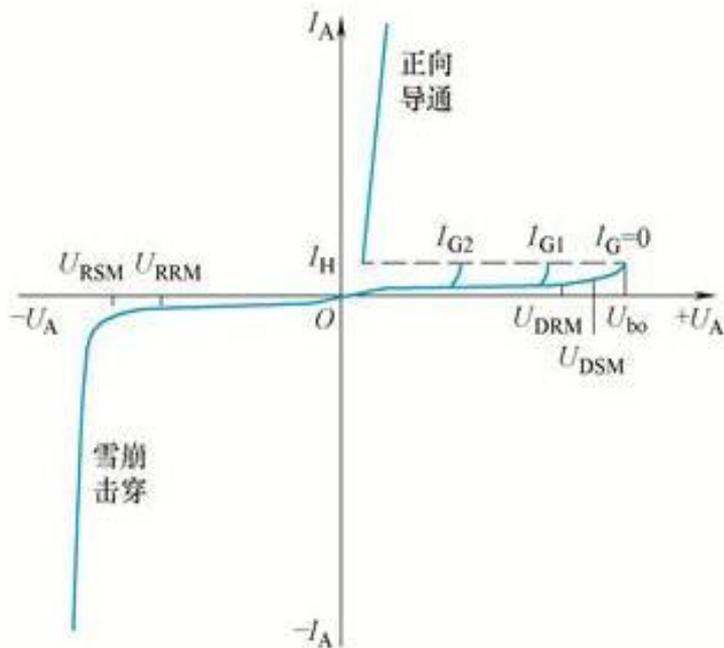


图2-9 晶闸管的伏安特性
 $I_{G2} > I_{G1} > I_G$

1) 正向特性

- 当 $I_G = 0$ 时，如果在器件两端施加正向电压，则晶闸管处于正向阻断状态，只有很小的正向漏电流流过。
- 如果正向电压超过临界极限即正向转折电压 U_{bo} ，则漏电流急剧增大，器件开通。
- 随着门极电流幅值的增大，正向转折电压降低，晶闸管本身的压降很小，在1V左右。
- 如果门极电流为零（ $I_G=0$ ），并且阳极流降至接近于零的某一数值 I_H 以下，则晶闸管又回到正向阻断状态， I_H 称为维持电流。

2.3.2 晶闸管的基本特性

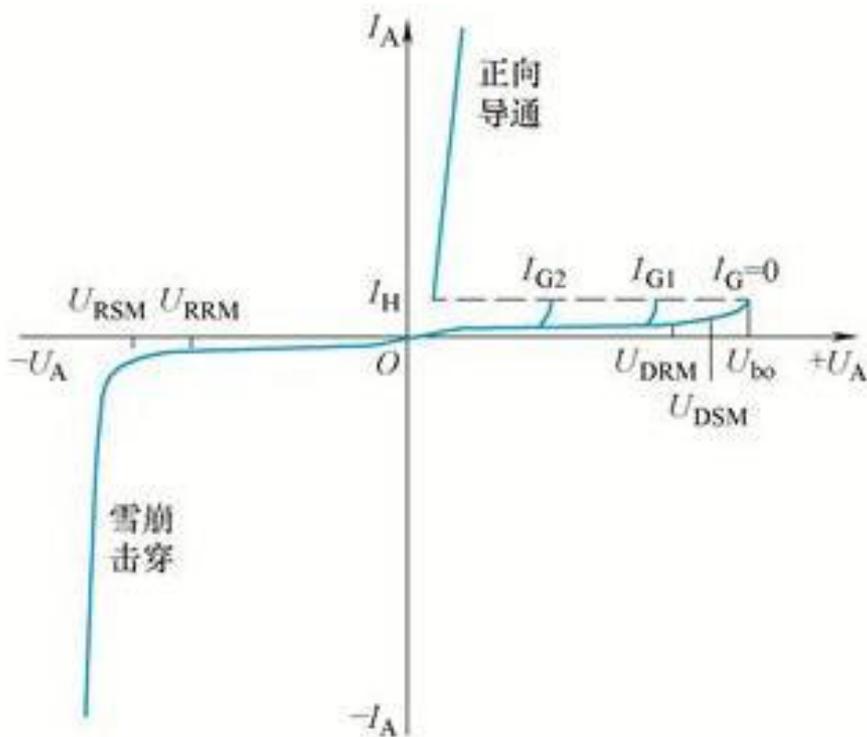


图2-9 晶闸管的伏安特性

$$I_{G2} > I_{G1} > I_G$$

2) 反向特性

- 其伏安特性类似二极管的反向特性。
- 晶闸管处于反向阻断状态时，只有极小的反向漏电流通过。
- 当反向电压超过一定限度，到反向击穿电压后，外电路如无限制措施，则反向漏电流急剧增大，导致晶闸管发热损坏。

2.3.2 晶闸管的基本特性

□ 动态特性

1) 开通过程

- 由于晶闸管内部的正反馈过程需要时间，再加上外电路电感的限制，晶闸管受到触发后，其阳极电流的增长不可能是瞬时的。

- ◆ 延迟时间 t_d (0.5~1.5 μ s)

- ◆ 上升时间 t_r (0.5~3 μ s)

- ◆ 开通时间 $t_{gt} = t_d + t_r$

- 延迟时间随门极电流的增大而减小，上升时间除反映晶闸管本身特性外，还受到外电路电感的严重影响。提高阳极电压，延迟时间和上升时间都可显著缩短。

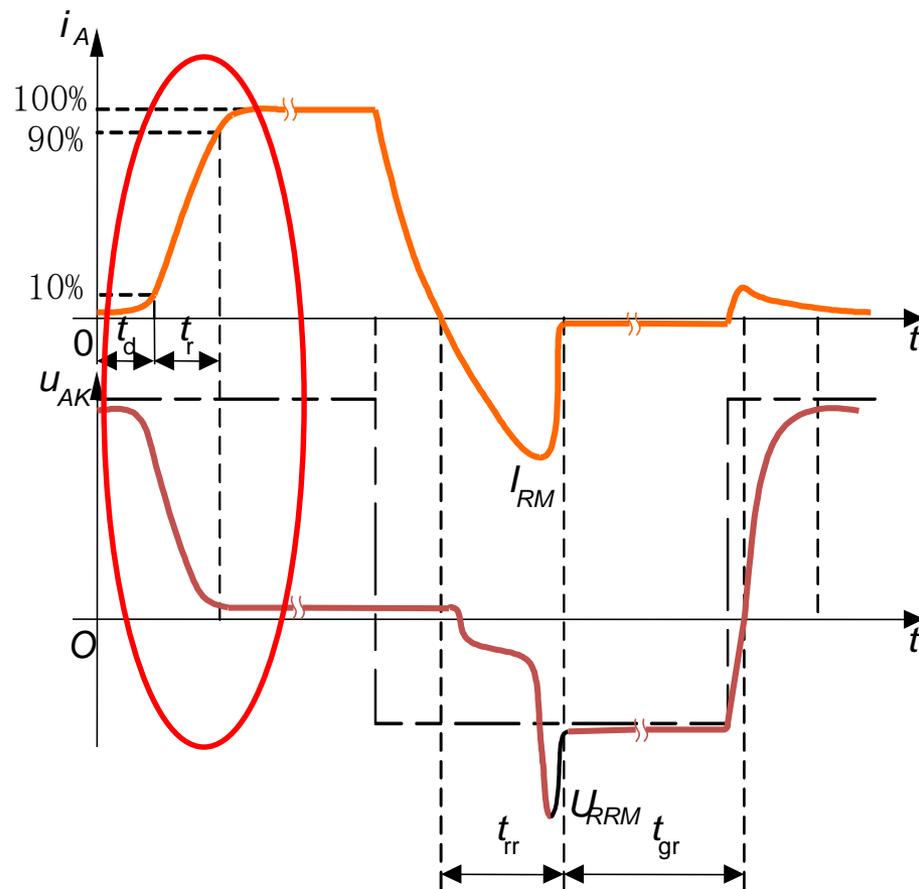


图2-10 晶闸管的开通和关断过程波形

2.3.2 晶闸管的基本特性

2) 关断过程

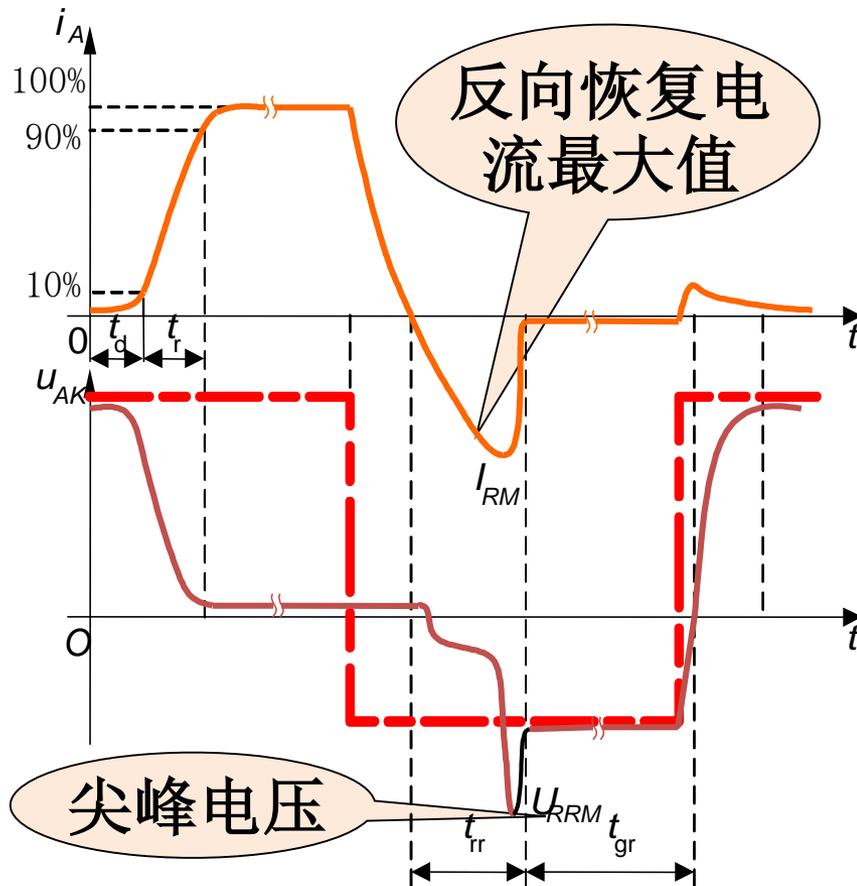


图2-10 晶闸管的开通和关断过程波形

➤ 由于外电路电感的存在，原处于导通状态的晶闸管当外加电压突然由正向变为反向时，其阳极电流在衰减时必然也是有过渡过程的。

◆ 反向阻断恢复时间-- t_{rr}

◆ 正向阻断恢复时间-- t_{gr}

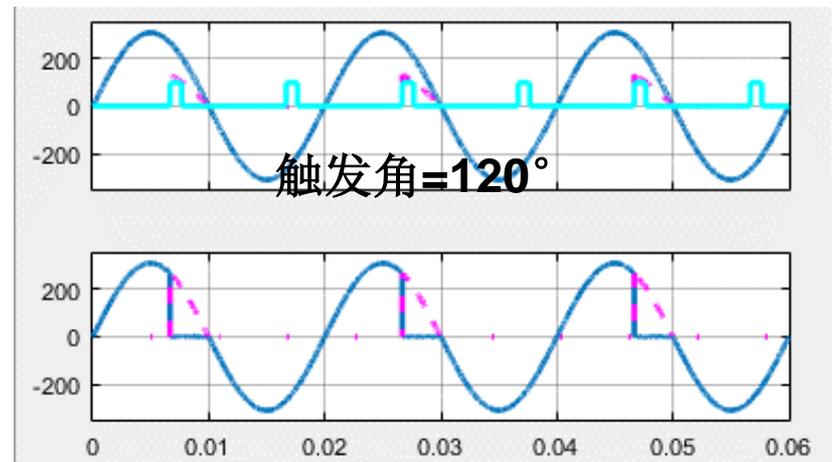
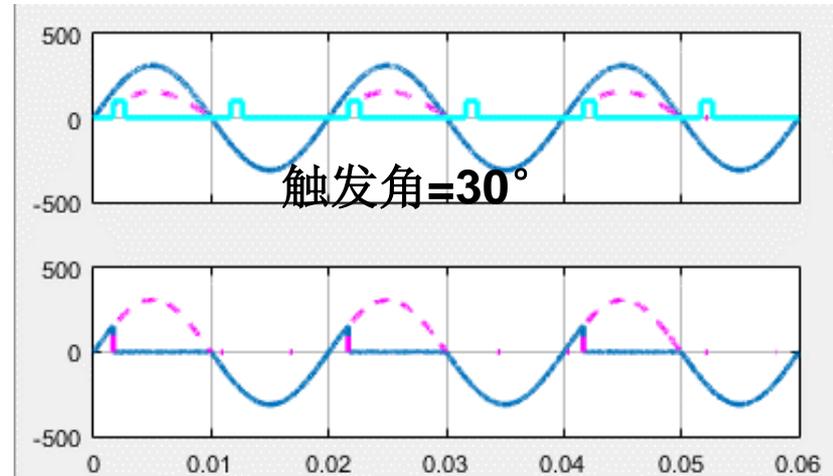
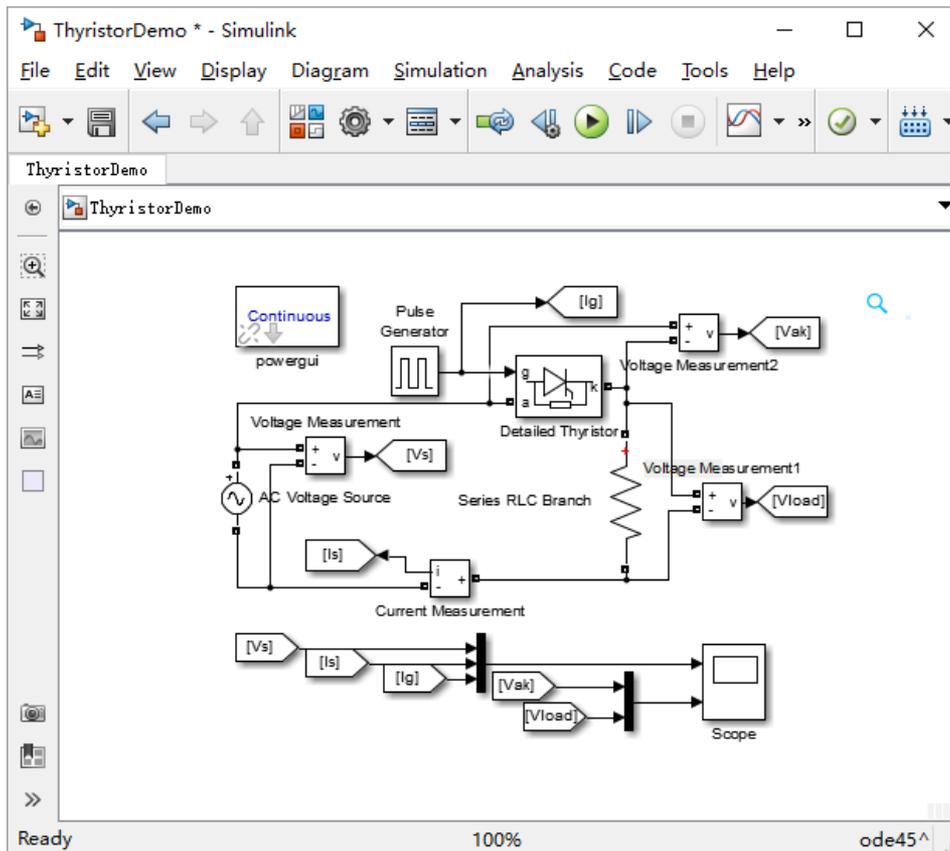
◆ 关断时间-- $t_q = t_{rr} + t_{gr}$

◆ 关断时间--约几百微秒。

➤ 在正向阻断恢复时间内，如果重新对晶闸管施加正向电压，晶闸管会重新正向导通，而不是受门极电流控制而导通。

2.3.2 晶闸管的基本特性

晶闸管仿真





2.3 半控型器件—晶闸管

2.3.1 晶闸管的结构与工作原理

2.3.2 晶闸管的基本特性

2.3.3 晶闸管的主要参数

2.3.4 晶闸管的派生器件



2.3.3 晶闸管的主要参数

□ 电压定额

1) 断态重复峰值电压 U_{DRM}

- 是在门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的正向峰值电压。
- 国标规定断态重复峰值电压 U_{DRM} 为断态不重复峰值电压（即断态最大瞬时电压） U_{DSM} 的90%。
- 断态不重复峰值电压应低于正向转折电压 U_{bo} 。

2) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

- 是在门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的反向峰值电压。
- 规定反向重复峰值电压 U_{RRM} 为反向不重复峰值电压（即反向最大瞬态电压） U_{RSM} 的90%。
- 反向不重复峰值电压应低于反向击穿电压。



2.3.3 晶闸管的主要参数

3) 通态（峰值）电压 U_{TM}

- 晶闸管通以某一规定倍数的额定通态平均电流时的瞬态峰值电压。
- 通常取晶闸管的 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的标值作为该器件的额定电压。
- 选用时，一般取额定电压为正常工作时晶闸管所承受峰值电压 $2\sim 3$ 倍。

□ 电流定额

1) 通态平均电流 $I_{T(AV)}$

- 国标规定通态平均电流为晶闸管在环境温度为 40°C 和规定的冷却状态下，稳定结温不超过额定结温时所允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。
- 同电力二极管的正向平均电流一样，这个参数也是按正向电流造成的器件本身的通态损耗的发热效应来定义的。
- 使用时，一般取其通态平均电流为按发热效应相等（即有效值相等）的原则所得计算结果的 $1.5\sim 2$ 倍。



2.3.3 晶闸管的主要参数

2) 维持电流 I_H

- 维持电流是指使晶闸管维持导通所必需的最小电流，一般为几十到几百毫安。
- 结温越高，则 I_H 越小。

3) 擎住电流 I_L

- 擎住电流是晶闸管刚从断态转入通态并移除触发信号后，能维持导通所需的最小电流。
- 约为 I_H 的2~4倍。

4) 浪涌电流 I_{TSM}

- 指由于电路异常情况引起的并使结温超过额定结温的不重复性最大正向过载电流。



2.3.3 晶闸管的主要参数

□ 动态参数

◆ 开通时间= t_{gt}

◆ 关断时间= t_q

◆ 断态电压临界上升率= du/dt

➤ 在额定结温和门极开路的情况下，不导致晶闸管从断态到通态转换的外加电压最大上升率。

➤ 电压上升率过大，使充电电流足够大，就会使晶闸管误导通。

◆ 通态电流临界上升率= di/dt

➤ 在规定条件下，晶闸管能承受而无有害影响的最大通态电流上升率。

➤ 如果电流上升太快，可能造成局部过热而使晶闸管损坏。



2.3 半控型器件—晶闸管

2.3.1 晶闸管的结构与工作原理

2.3.2 晶闸管的基本特性

2.3.3 晶闸管的主要参数

2.3.4 晶闸管的派生器件



2.3.4 晶闸管的派生器件

1) 快速晶闸管 (Fast Switching Thyristor——FST)

◆ 有快速晶闸管和高频晶闸管。

- 快速晶闸管的开关时间以及 du/dt 和 di/dt 的耐量都有了明显改善。
- 从关断时间来看，普通晶闸管一般为数百微秒，快速晶闸管为数十微秒，而高频晶闸管则为 $10\mu s$ 左右。
- 高频晶闸管的不足在于其电压和电流定额都不易做高。
- 由于工作频率较高，选择快速晶闸管和高频晶闸管的通态平均电流时不能忽略其开关损耗的发热效应。

2.3.4 晶闸管的派生器件

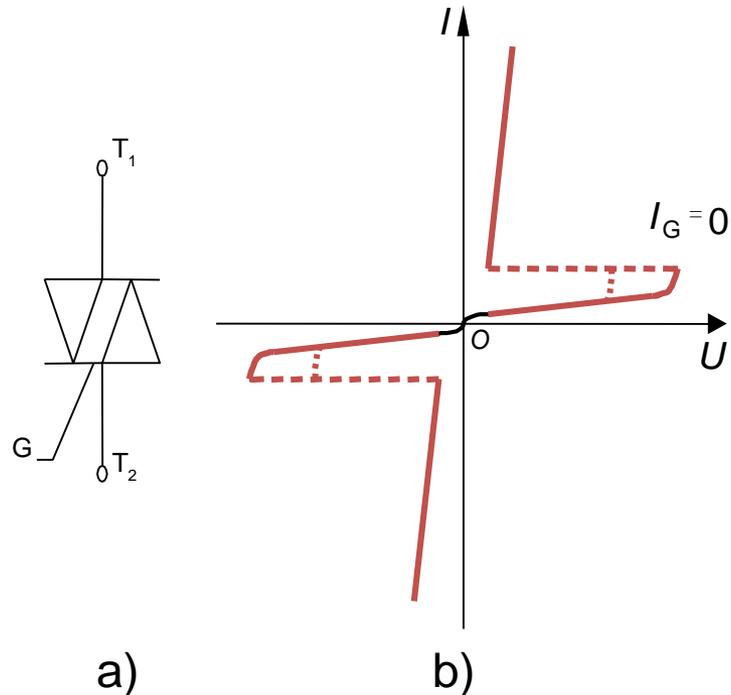


图2-11 双向晶闸管的电气图形符号和伏安特性

a) 电气图形符号 b) 伏安特性

2) 双向晶闸管 (Triode AC Switch——TRIAC 或 Bidirectional triode thyristor)

- 可以认为是一对反并联连接的普通晶闸管的集成。
- 门极使器件在主电极的正反两方向均可触发导通，在第I和第III象限有对称的伏安特性。
- 双向晶闸管通常用在交流电路中，因此不用平均值而用有效值来表示其额定电流值。

2.3.4 晶闸管的派生器件

3) 逆导晶闸管 (Reverse Conducting Thyristor—RCT)

- 是将晶闸管反并联一个二极管制作在同一管芯上的功率集成器件，不具有承受反向电压的能力，一旦承受反向电压即开通。
- 具有正向压降小、关断时间短、高温特性好、额定结温高等优点，可用于不需要阻断反向电压的电路中。

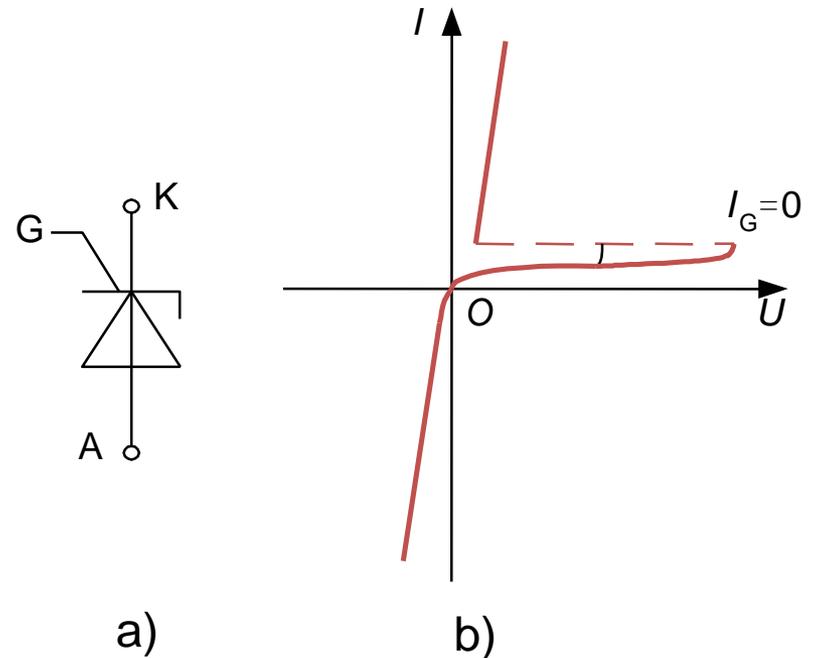


图2-12 逆导晶闸管的电气图形符号和伏安特性

a) 电气图形符号 b) 伏安特性

2.3.4 晶闸管的派生器件

4) 光控晶闸管 (Light Triggered Thyristor——LTT)

- 是利用一定波长的光照信号触发导通的晶闸管。
- 由于采用光触发保证了主电路与控制电路之间的绝缘，而且可以避免电磁干扰的影响，因此光控晶闸管目前应用在高压大功率的场合。

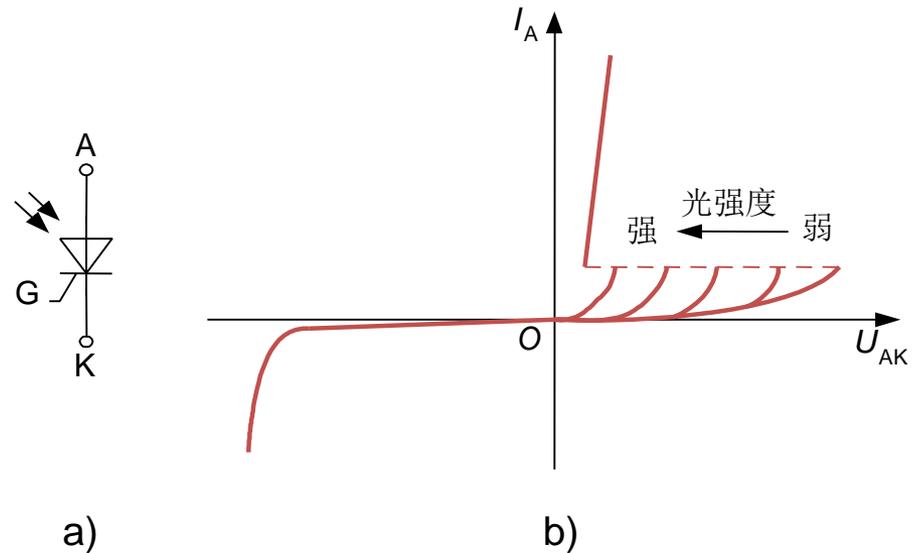


图2-13 光控晶闸管的电气图形符号和伏安特性
a) 电气图形符号 b) 伏安特性



第2章 电力电子器件

Chapter 2: Power Electronic Devices

2.1 电力电子器件概述

2.2 不可控器件——电力二极管

2.3 半控型器件——晶闸管

2.4 典型全控型器件

2.5 其他新型电力电子器件

2.6 功率集成电路与集成电力电子模块

本章小结

2.4 典型全控型器件

- 门极可关断晶闸管在晶闸管问世后不久出现。
- 20世纪80年代以来，电力电子技术进入了一个崭新时代。
- 典型代表——门极可关断晶闸管、电力晶体管、电力场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管。



电力MOSFET



IGBT单管及模块





2.4 典型全控型器件

2.4.1 门极可关断晶闸管

2.4.2 电力晶体管

2.4.3 电力场效应晶体管

2.4.4 绝缘栅双极晶体管



2.4 典型全控型器件

2.4.1 门极可关断晶闸管

2.4.2 电力晶体管

2.4.3 电力场效应晶体管

2.4.4 绝缘栅双极晶体管



2.4.1 门极可关断晶闸管GTO

■ 门极可关断晶闸管（Gate Turn Off Thyristor , **GTO**）

- 晶闸管的一种**派生器件**。
- 可以通过在门极施加**负的脉冲电流**使其**关断**，因而属于**全控型器件**。
- GTO的电压、电流容量较大，与普通晶闸管接近，因而在兆瓦级以上的大功率场合仍有较多的应用。



MITSUBISHI GTO

全控器件； 电流驱动型； 脉冲驱动型； 双极型器件。

2.4.1 门极可关断晶闸管GTO

□ GTO的结构和工作原理

◆ GTO的结构

- 是PNPN四层半导体结构。
- 是一种多元的功率集成器件，虽然外部同样引出3个极，但内部则包含数十个甚至数百个共阳极的小GTO元，这些GTO元的阴极和门极则在器件内部并联在一起。

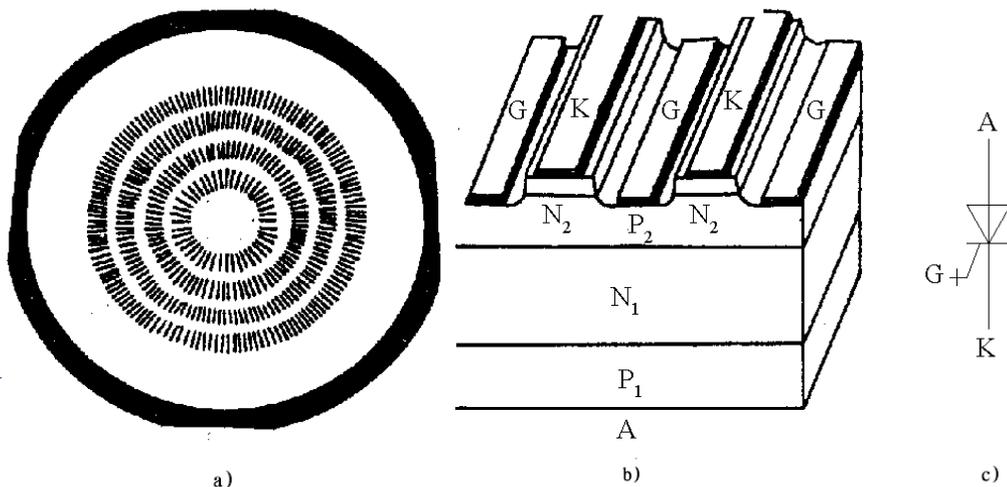


图2-14 GTO的内部结构和电气图形符号

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

2.4.1 门极可关断晶闸管GTO

◆GTO的工作原理

➤ 仍然可以用如图所示的**双晶体管模型**来分析， V_1 、 V_2 的**共基极电流增益**分别是 α_1 、 α_2 。 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 是器件临界导通的条件，**大于1导通，小于1则关断。**

●GTO与普通晶闸管的不同

- 设计 α_2 较大，使晶体管 **V_2 控制灵敏**，易于**GTO关断**。
- 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**→**关断GTO**。

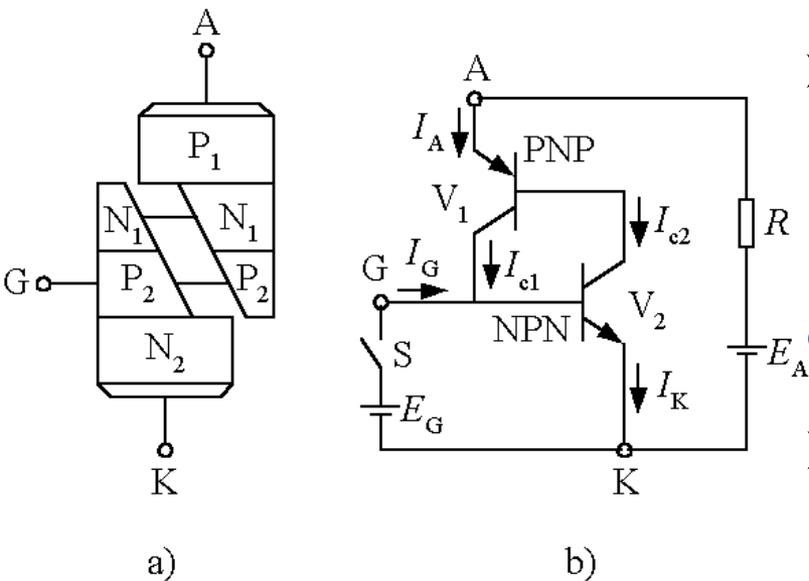


图2-8 晶闸管的双晶体管模型及其工作原理

a) 双晶体管模型 b) 工作原理



2.4.1 门极可关断晶闸管GTO

结论:

导通: GTO的导通过程与普通晶闸管是一样的, 只不过导通时饱和程度较浅。

关断: 门极加负脉冲, 即从门极抽出电流, 当两个晶体管发射极电流 I_A 和 I_K 的减小使 $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ 时, 器件退出饱和而关断。

多元集成结构: 使得GTO比普通晶闸管开通过程更快, 承受 di/dt 的能力增强。

2.4.1 门极可关断晶闸管GTO

□ GTO的动态特性

◆ 开通过程

➤ 与普通晶闸管类似。

- ✓ 延迟时间 t_d
- ✓ 上升时间 t_r
- ✓ 开通时间 $t_{gt} = t_d + t_r$

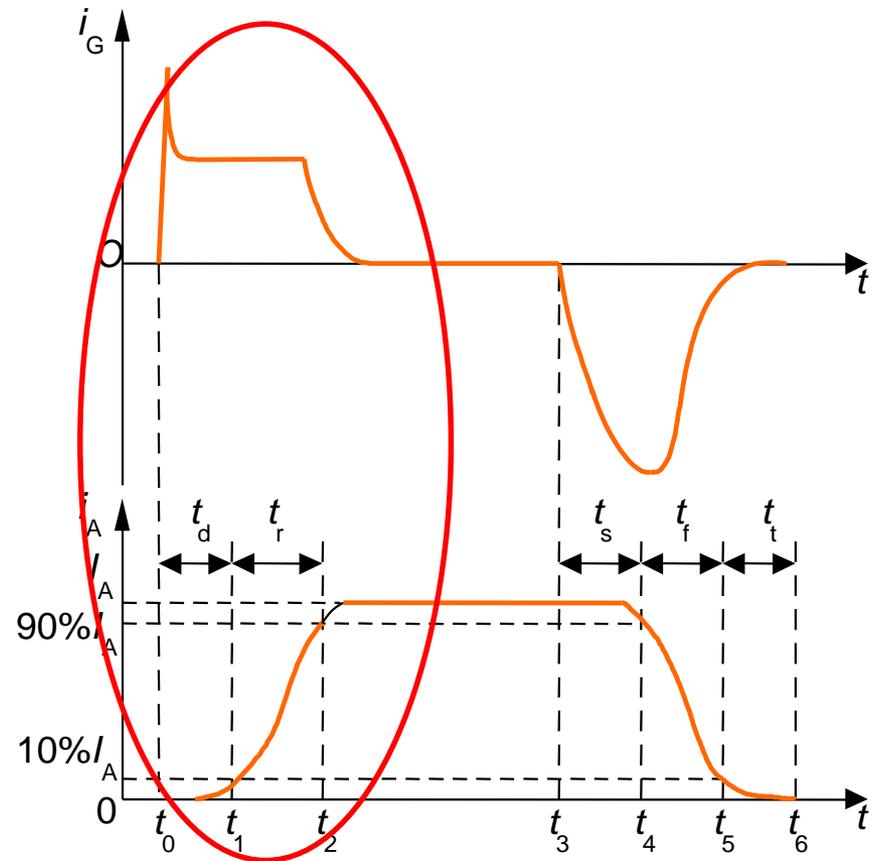


图2-15 GTO的开通和关断过程电流波形

2.4.1 门极可关断晶闸管GTO

◆ 关断过程

① 储存时间 = t_s

② 下降时间 = t_f

③ 尾部时间 = t_t

➤ 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，前沿越陡， t_s 就越短。

➤ 门极负脉冲的后沿缓慢衰减，在 t_t 阶段仍能保持适当的负电压，则可以缩短尾部时间 t_t 。

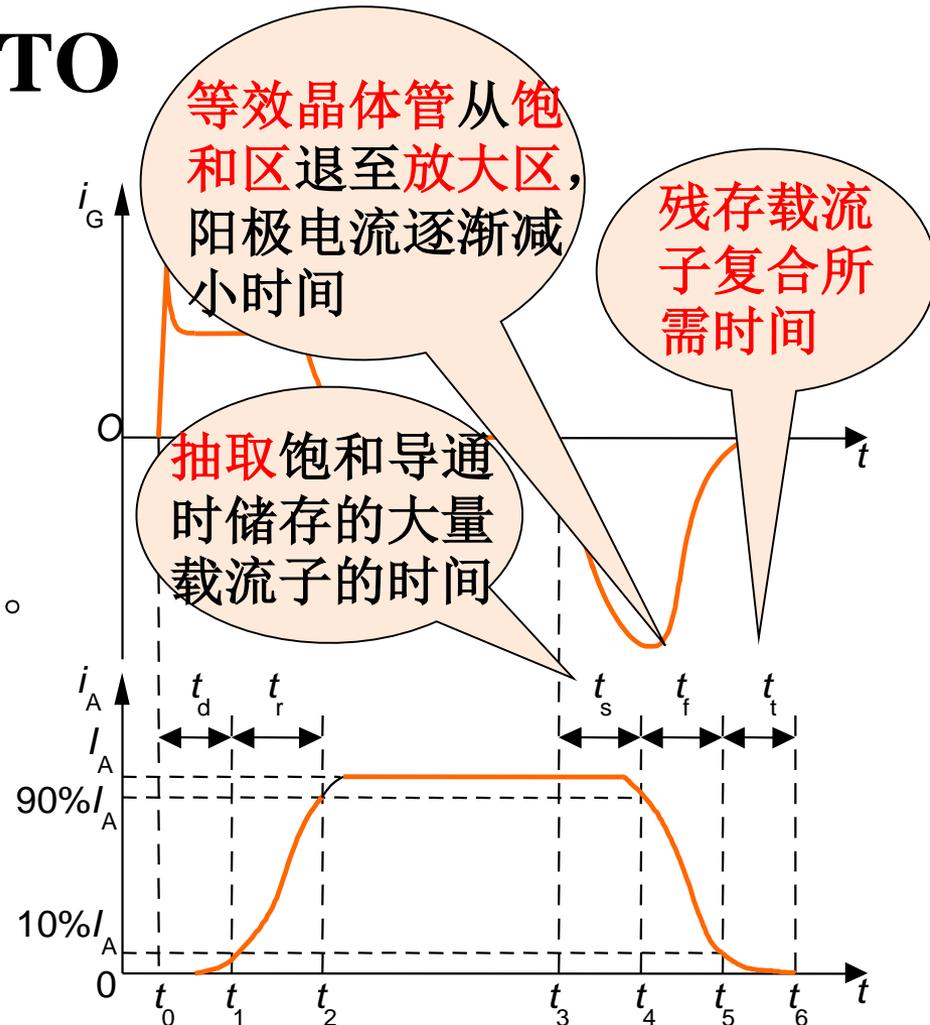


图2-15 GTO的开通和关断过程电流波形



2.4.1 门极可关断晶闸管GTO

□ GTO的主要参数

- GTO的许多参数都和普通晶闸管相应的参数意义相同。

□ 其它参数

① 最大可关断阳极电流 I_{ATO} ;

- 用来标称GTO额定电流。

② 电流关断增益 β_{off}

- 最大可关断阳极电流 I_{ATO} 与门极负脉冲电流最大值 I_{GM} 之比。

- β_{off} 一般很小，只有5左右，这是GTO的一个主要缺点。



2.4.1 门极可关断晶闸管GTO

③ 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值的增大而增大。

④ 关断时间 t_{off}

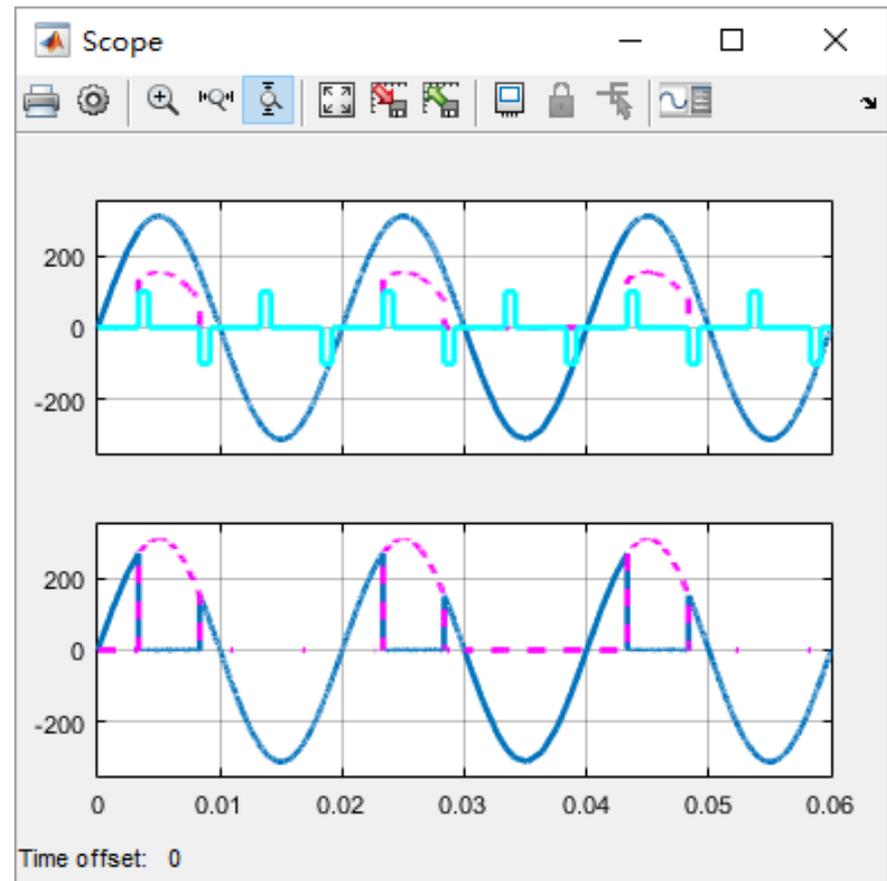
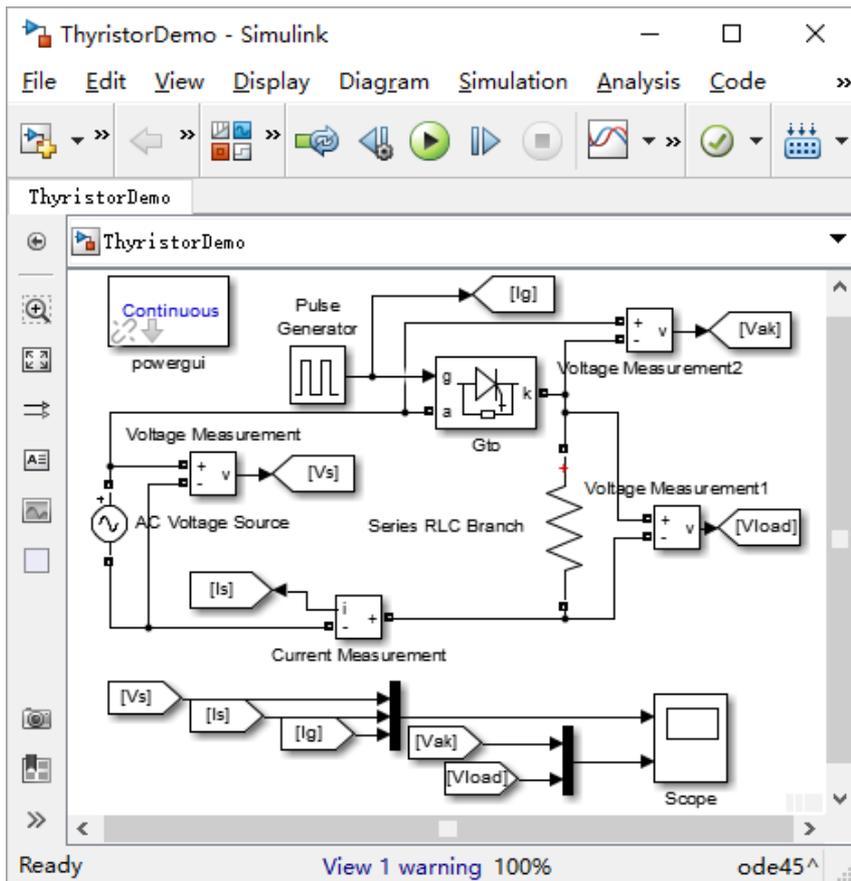
➤ 一般指储存时间和下降时间之和，而不包括尾部时间。

➤ 储存时间随阳极电流的增大而增大，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。当需要承受反向电压时，应和电力二极管串联使用。

2.4.1 门极可关断晶闸管GTO

□ GTO仿真





2.4 典型全控型器件

2.4.1 门极可关断晶闸管

2.4.2 电力晶体管

2.4.3 电力场效应晶体管

2.4.4 绝缘栅双极晶体管



2.4.2 电力晶体管

- 电力晶体管（Giant Transistor——GTR）按英文直译为巨型晶体管。
- **GTR**是一种耐高电压、大电流的**双极结型晶体管（Bipolar Junction Transistor——BJT）**，有时英文也称为**Power BJT**。
- 20世纪80年代以来，**GTR**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。

全控器件； 电流驱动型； 电平驱动型； 双极型器件。

2.4.2 电力晶体管

□ GTR的结构和工作原理

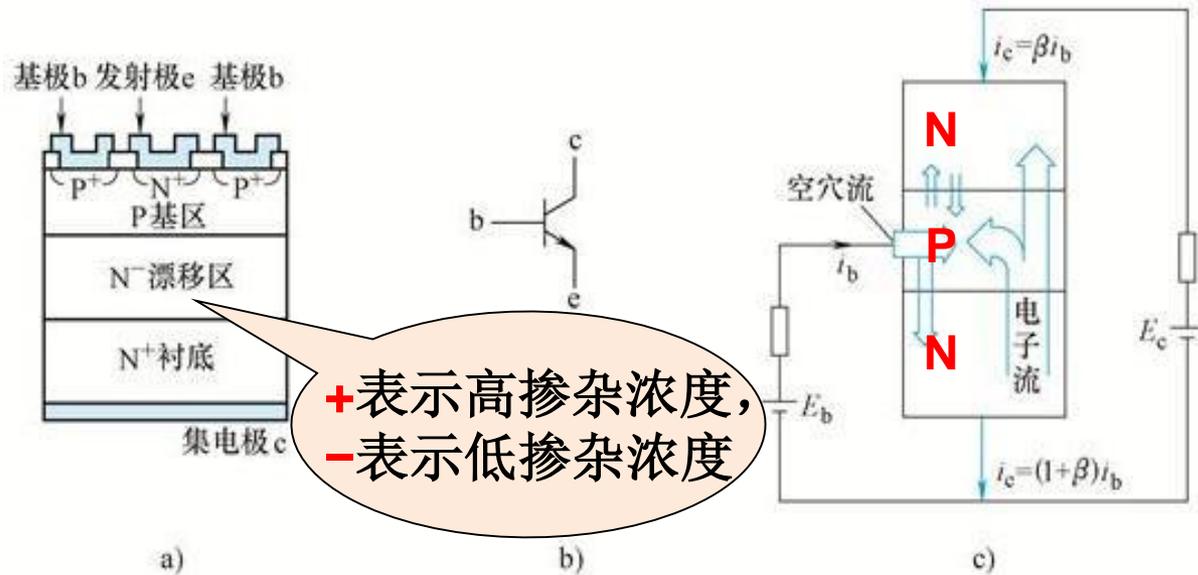


图2-16 GTR的结构、电气图形符号和内部载流子的流动
 a)内部结构断面示意图 b) 电气图形符号
 c) 内部载流子的流动

- 与普通的双极结型晶体管基本原理是一样的。
- 主要的特性：耐压高、电流大、开关特性好。
- 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是由三层半导体构成，多采用NPN结构。

2.4.2 电力晶体管

- ◆ 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：

$$\beta = \frac{i_c}{i_b} \quad (2-9)$$

- β 称为GTR的**电流放大系数**，它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_{ceo}** 时， i_c 和 i_b 的关系为：

$$i_c = \beta i_b + I_{ceo} \quad (2-10)$$

- 单管GTR的 β 值比处理信息用的小功率晶体管**小得多**，通常为**10**左右，采用**达林顿接法**可以有效地**增大电流增益**。

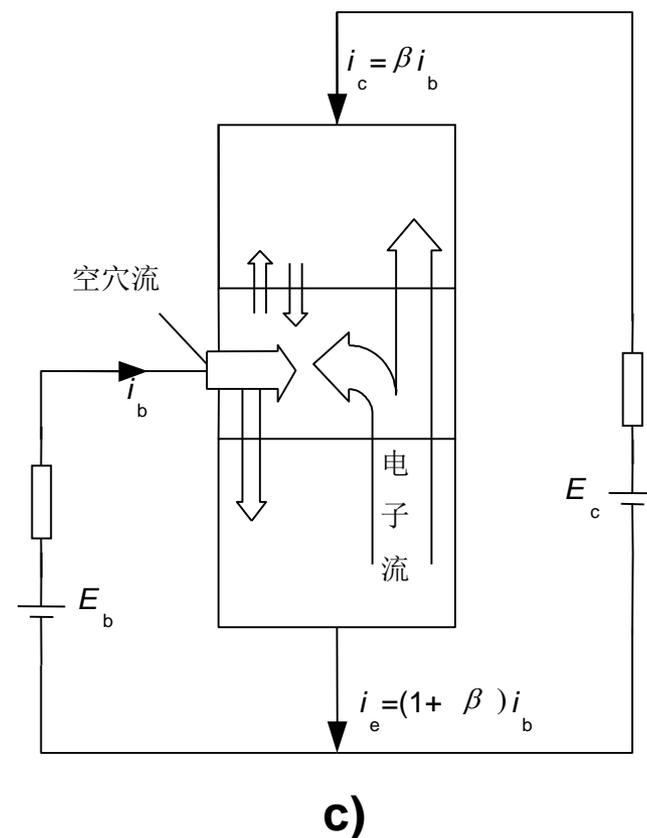


图2-16 内部载流子的流动

2.4.2 电力晶体管

□ 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。

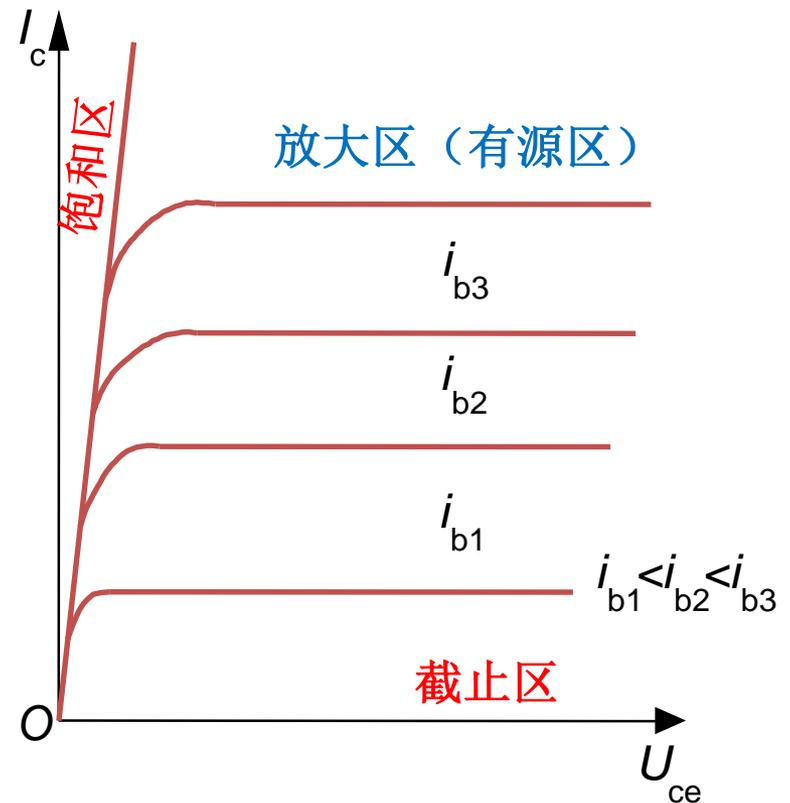


图2-17 共发射极接法时 GTR的输出特性

2.4.2 电力晶体管

◆ 动态特性—开关特性

● 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。

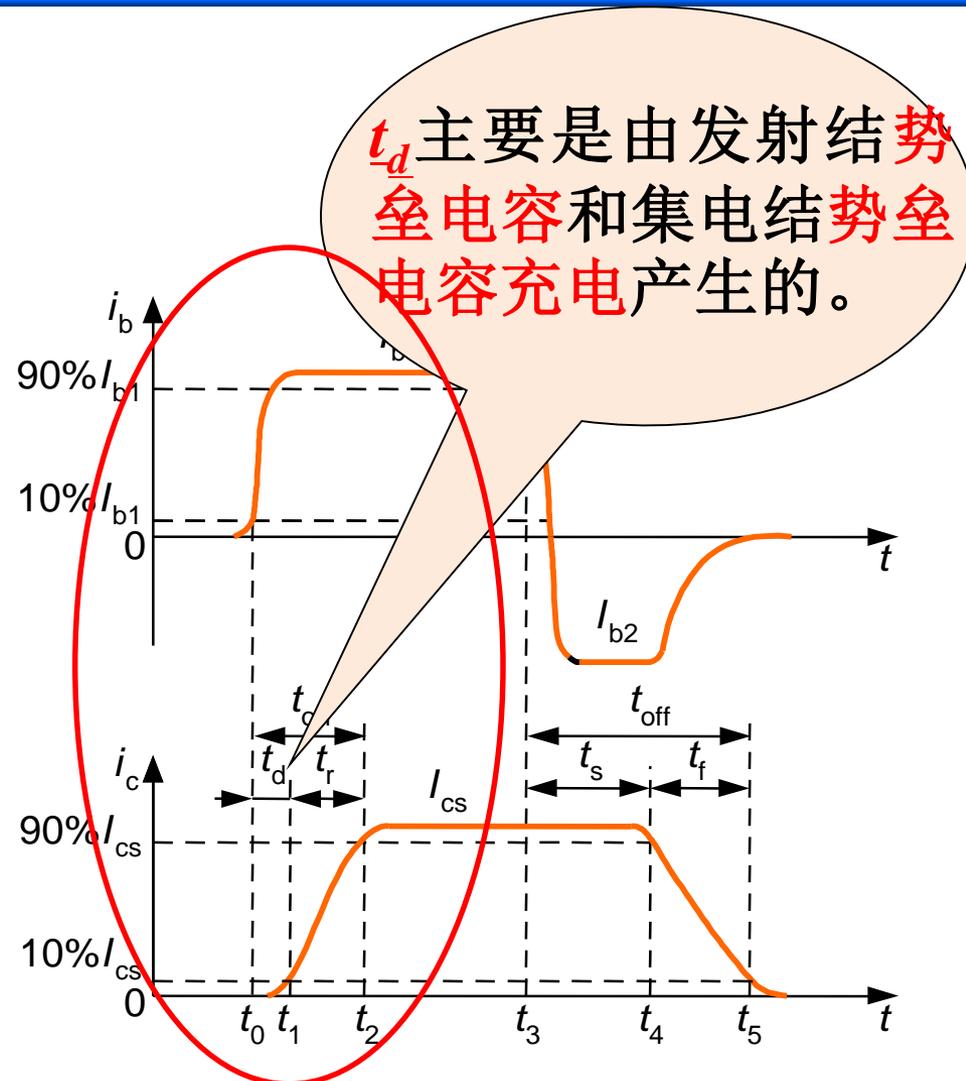


图2-18 GTR的开通和关断过程电流波形

2.4.2 电力晶体管

● 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。

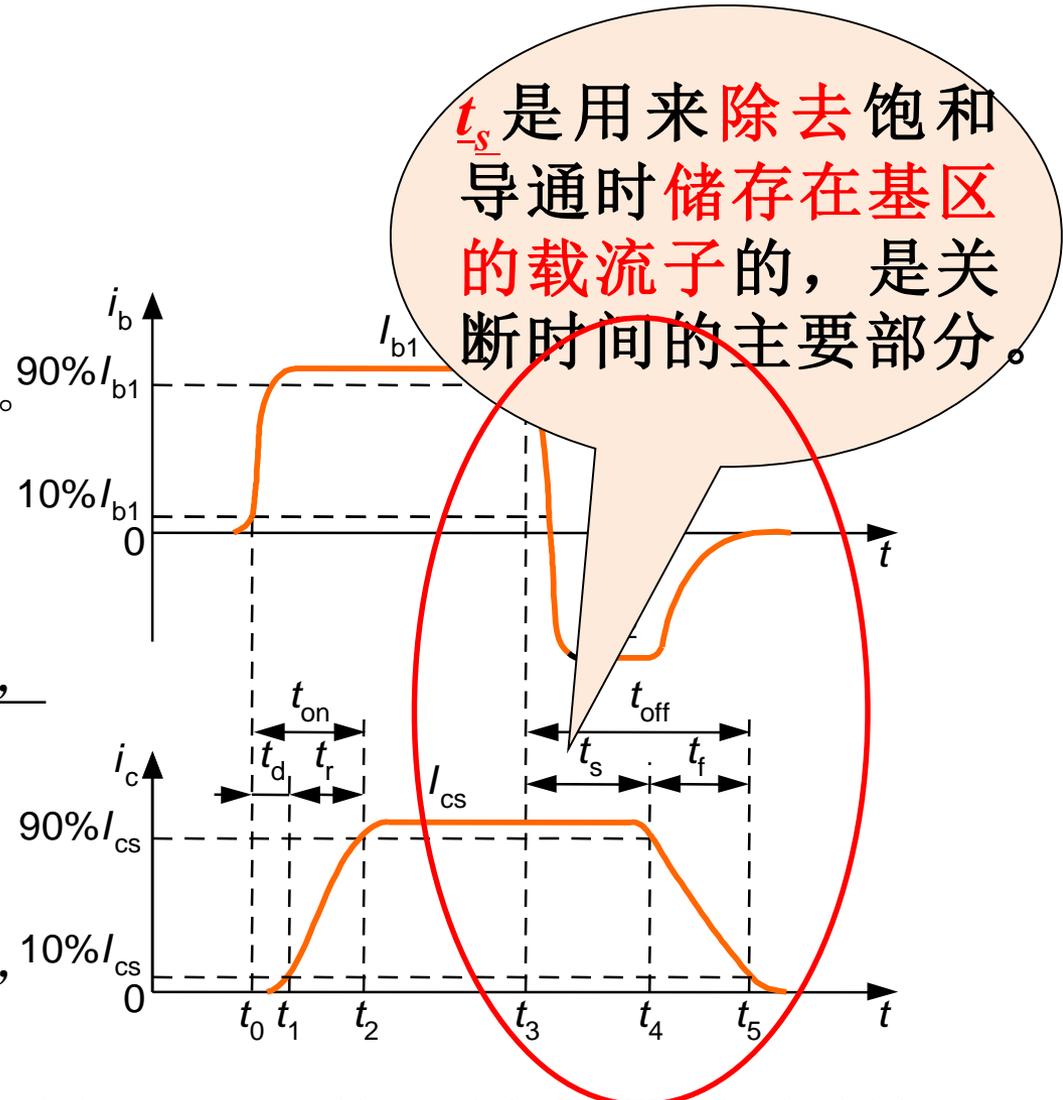


图2-18 GTR的开通和关断过程电流波形



2.4.2 电力晶体管

□ GTR的主要参数

- 电流放大倍数 β
- 直流电流增益 h_{FE}
- 集电极与发射极间漏电流 I_{ceo}
- 集电极和发射极间饱和压降 U_{ces}
- 开通时间 t_{on}
- 关断时间 t_{off}



2.4.2 电力晶体管

□ GTR其它主要参数

1) 最高工作电压

- GTR上所加的电压超过规定值时，就会发生**击穿**。
- 击穿电压不仅和**晶体管本身的特性**有关，还与外电路的接法有关。
 - ① 发射极开路时，**集电极和基极间**的反向击穿电压 BU_{cbo}
 - ② 基极开路时，**集电极和发射极间**的击穿电压 BU_{ceo}
 - ③ 发射极与基极间用电阻联接或短路联接时，**集电极和发射极间**的击穿电压 BU_{cer} 和 BU_{ces}
 - ④ 发射结反向偏置时，**集电极和发射极间**的击穿电压 BU_{cex}

这些击穿电压间存在以下关系：

$$BU_{cbo} > BU_{cex} > BU_{ces} > BU_{cer} > BU_{ceo}$$

- ✓ 实际使用GTR时，为了确保安全，最高工作电压要比 BU_{ceo} 低得多。



2.4.2 电力晶体管

2) 集电极最大允许电流 I_{cM}

- 通常规定为直流电流增益 (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 ，间接表示了最高工作温度。



2.4.2 电力晶体管

□ GTR的二次击穿现象与安全工作区

一次击穿：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。

二次击穿：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。

2.4.2 电力晶体管

◆ 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。

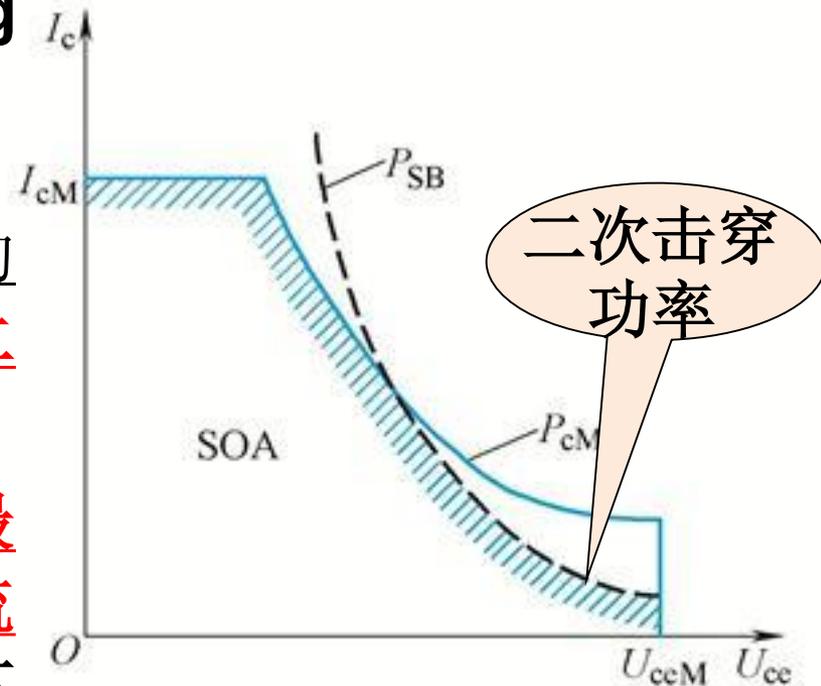


图2-19 GTR的安全工作区



2.4 典型全控型器件

2.4.1 门极可关断晶闸管

2.4.2 电力晶体管

2.4.3 电力场效应晶体管

2.4.4 绝缘栅双极晶体管



2.4.3 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
- 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）
- ◆ 电力MOSFET是用栅极电压来控制漏极电流的，其特点：
 - 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。

全控器件；电压驱动型；电平驱动型；单极型器件。



2.4.3 电力场效应晶体管

□ 电力MOSFET的结构和工作原理

◆ 电力MOSFET的种类

➤ 按导电沟道：

分为P沟道和N沟道。

➤ 按导电沟道形成条件：

分为耗尽型和增强型。

● 耗尽型：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。

● 增强型：对于N（P）沟道器件，栅极电压大于（小于）零时，才存在导电沟道的称为增强型。

✓ 在电力MOSFET中，主要是N沟道增强型。

2.4.3 电力场效应晶体管

◆ 电力MOSFET的结构

- 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：小功率MOS管是横向导电器件；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。

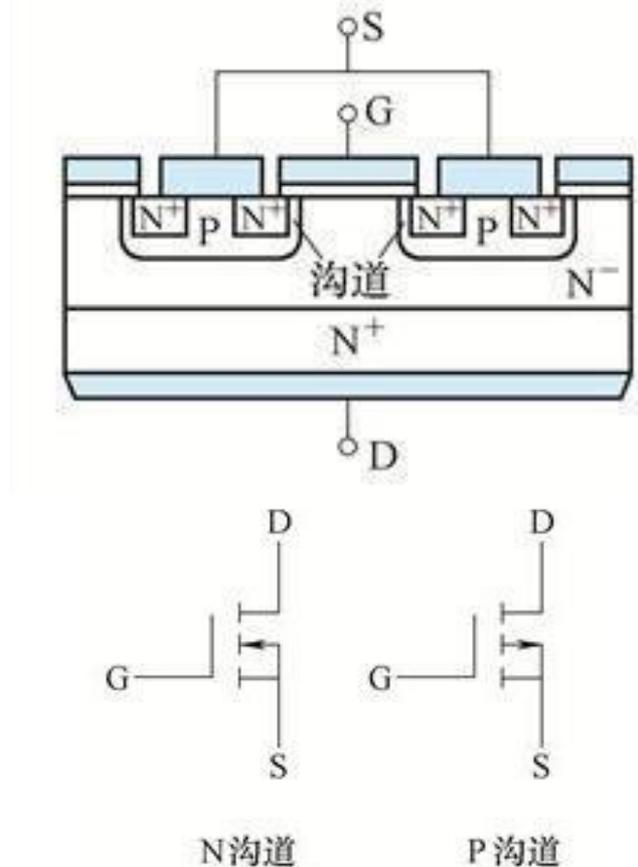


图2-20 电力MOSFET的结构和电气图形符号
 a) 内部结构断面示意图
 b) 电气图形符号

2.4.3 电力场效应晶体管

◆ 电力MOSFET的结构

- 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。

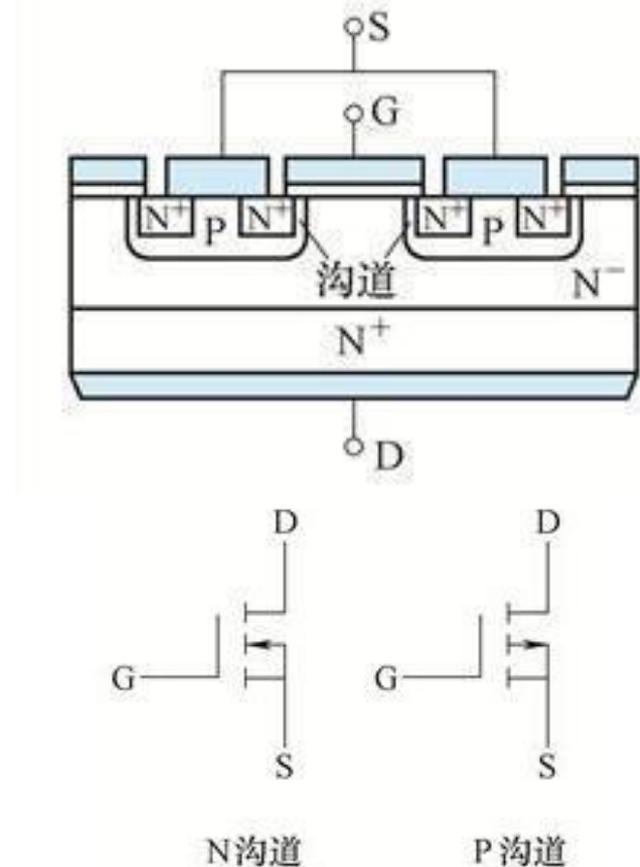


图2-20 电力MOSFET的结构和电气图形符号

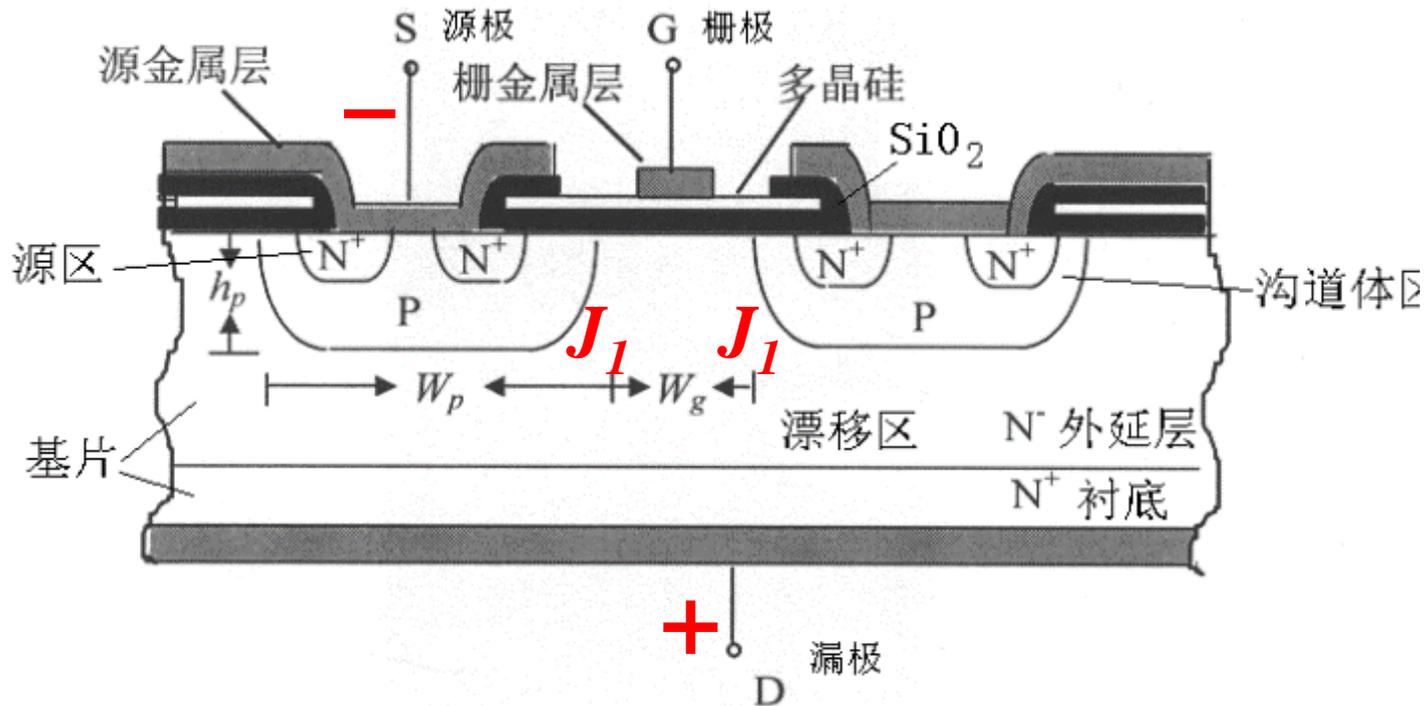
- a) 内部结构断面示意图
- b) 电气图形符号

2.4.3 电力场效应晶体管

◆ 电力MOSFET的工作原理

➤ 截止:

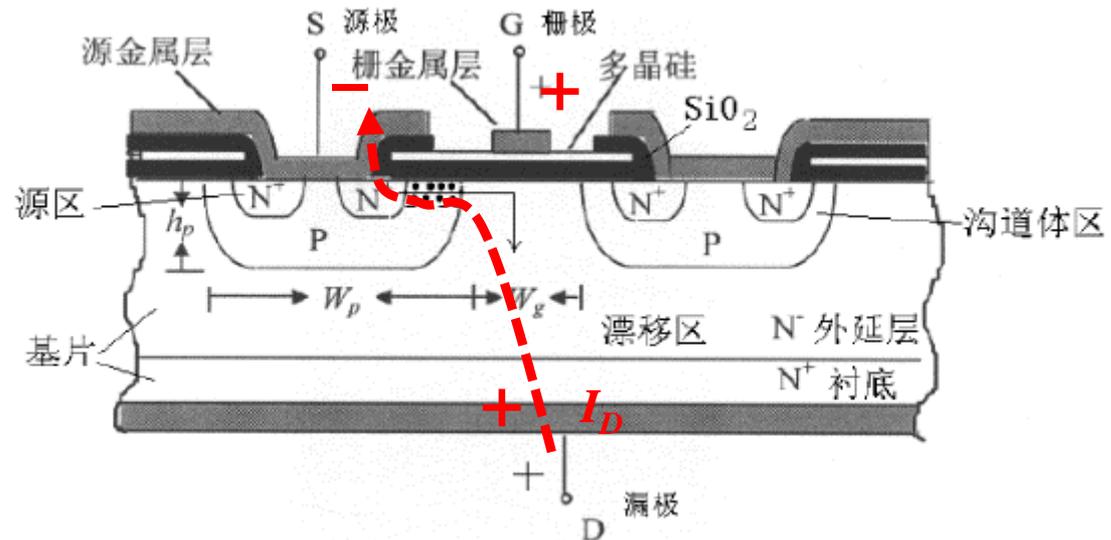
- ✓ 当漏源极间接正电压，栅极和源极间电压为零时，P基区与N漂移区之间形成的PN结 J_1 反偏，漏源极之间无电流流过。



2.4.3 电力场效应晶体管

◆ 电力MOSFET的工作原理

- **导通**：在栅极和源极之间加一正电压 U_{GS} ，正电压会将其下面P区中的空穴推开，而将P区中的少数—电子吸引到栅极下面的P区表面。
- ✓ 当 U_{GS} 大于某一电压值 U_T 时，使P型半导体反型成N型半导体，该反型层形成N沟道而使PN结 J_1 消失，漏极和源极导电。
- ✓ U_T 称为开启电压（或阈值电压）， U_{GS} 超过 U_T 越多，导电能力越强，漏极电流 I_D 越大。



2.4.3 电力场效应晶体管

□ 电力MOSFET的基本特性

◆ 静态特性—伏安特性

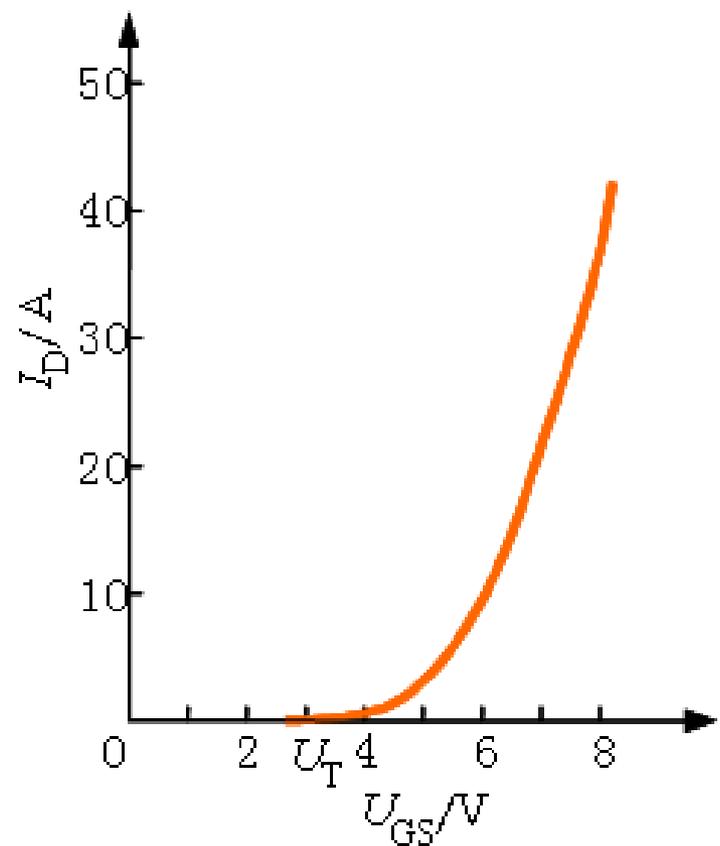
➢ 转移特性

✓ 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

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

✓ 电压控制型器件，其输入阻抗极高，输入电流非常小。



a)

图2-21 电力MOSFET的转移特性和输出特性

a) 转移特性

2.4.3 电力场效应晶体管

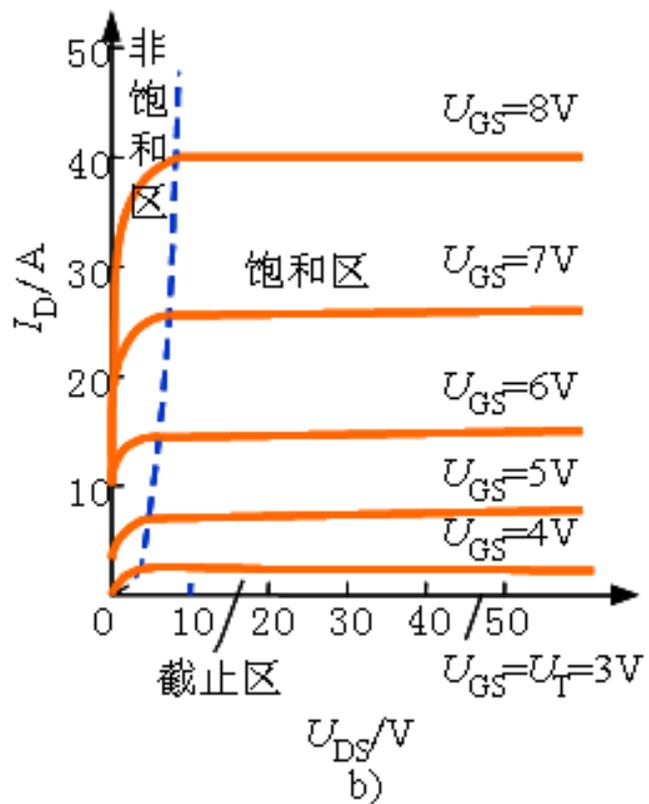


图2-21 电力MOSFET的转移特性和输出特性
b) 输出特性

➤ 输出特性

- ✓ 是MOSFET的漏极伏安特性。
- ✓ 三个区域：截止区（GTR的截止区）、饱和区（GTR的放大区）、非饱和区（GTR的饱和区）。
- 饱和区是指漏源电压增加时漏极电流不再增加；
- 非饱和区是指漏源电压增加时漏极电流相应增加。

2.4.3 电力场效应晶体管

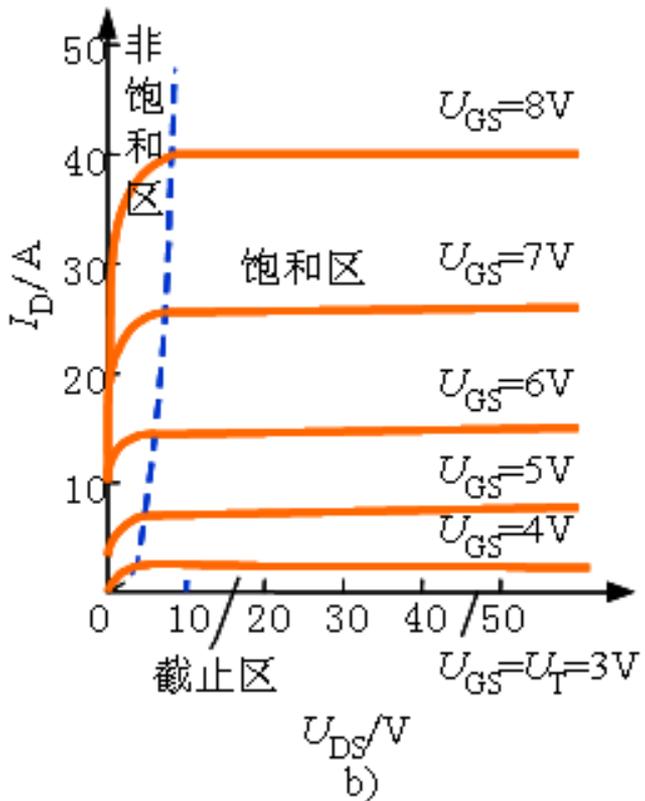


图2-21 电力MOSFET的转移特性和输出特性
b) 输出特性

➤ 输出特性

- ✓ 工作在开关状态，即在截止区和非饱和区之间来回转换。
- ✓ 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（不能反向阻断）。
- ✓ 通态电阻具有正温度系数，对器件并联时的均流有利。?

2.4.3 电力场效应晶体管

◆ 动态特性—开关过程

➤ 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 $t_{on} = t_{d(on)} + t_{ri} + t_{fv}$

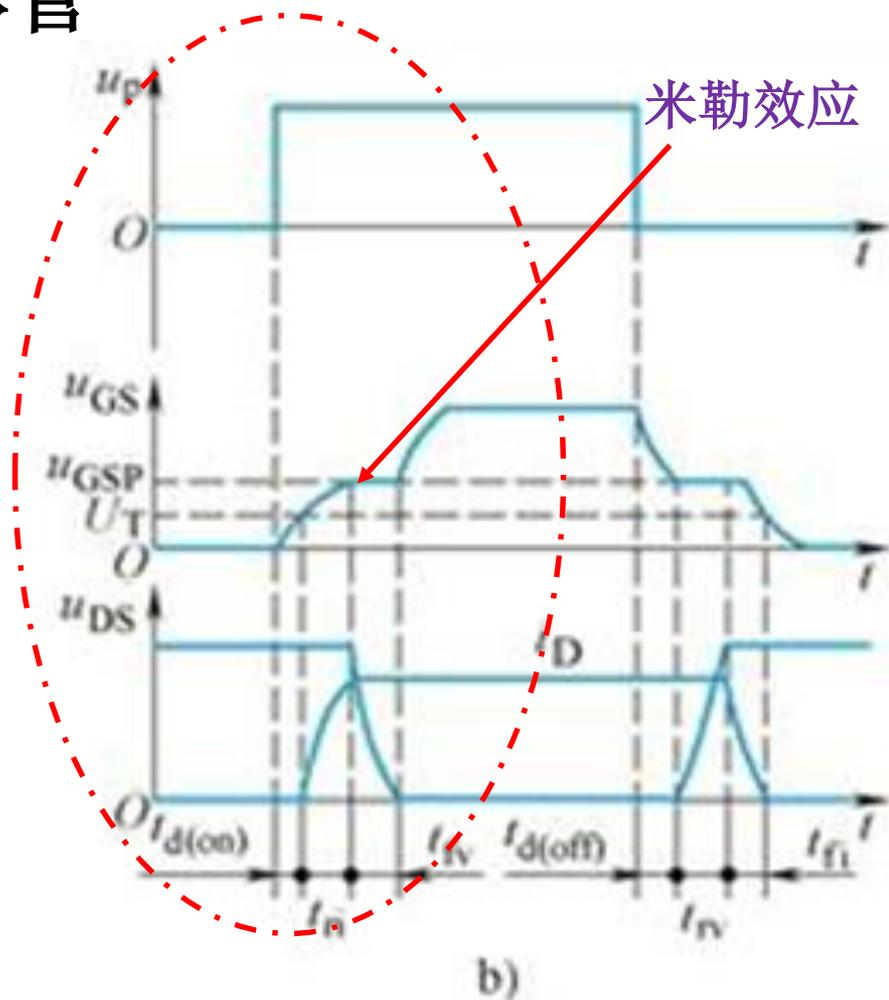


图2-22 电力MOSFET的开关过程
a)测试电路 b) 开关过程波形

2.4.3 电力场效应晶体管

◆ 动态特性—开关过程

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

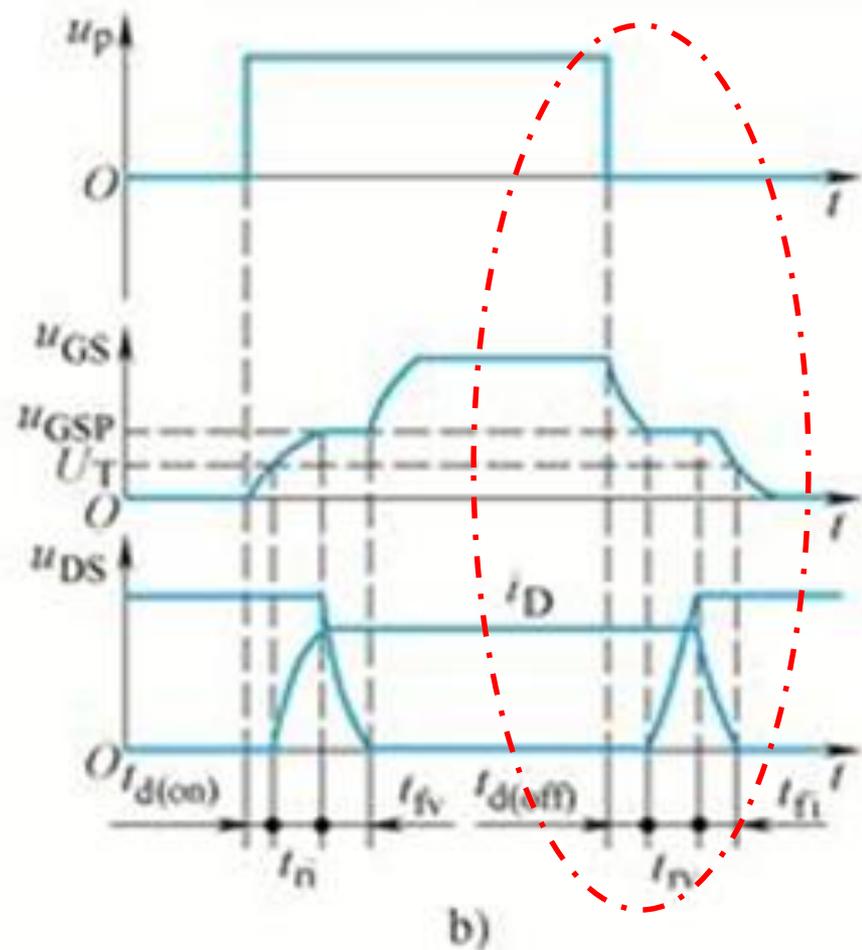


图2-22 电力MOSFET的开关过程
a)测试电路 b) 开关过程波形



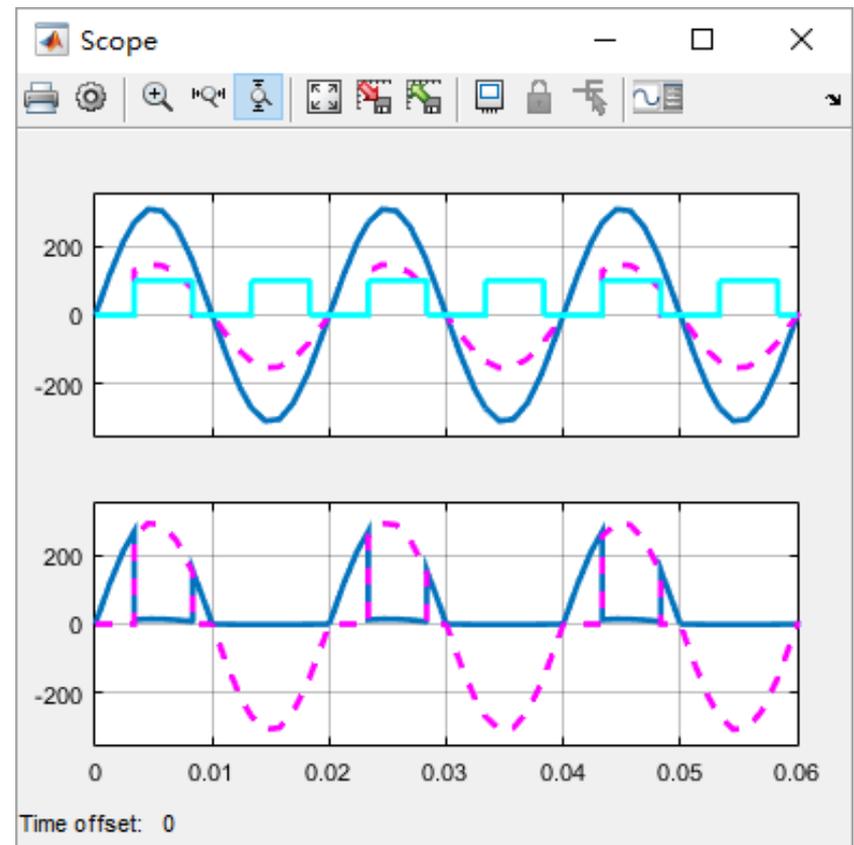
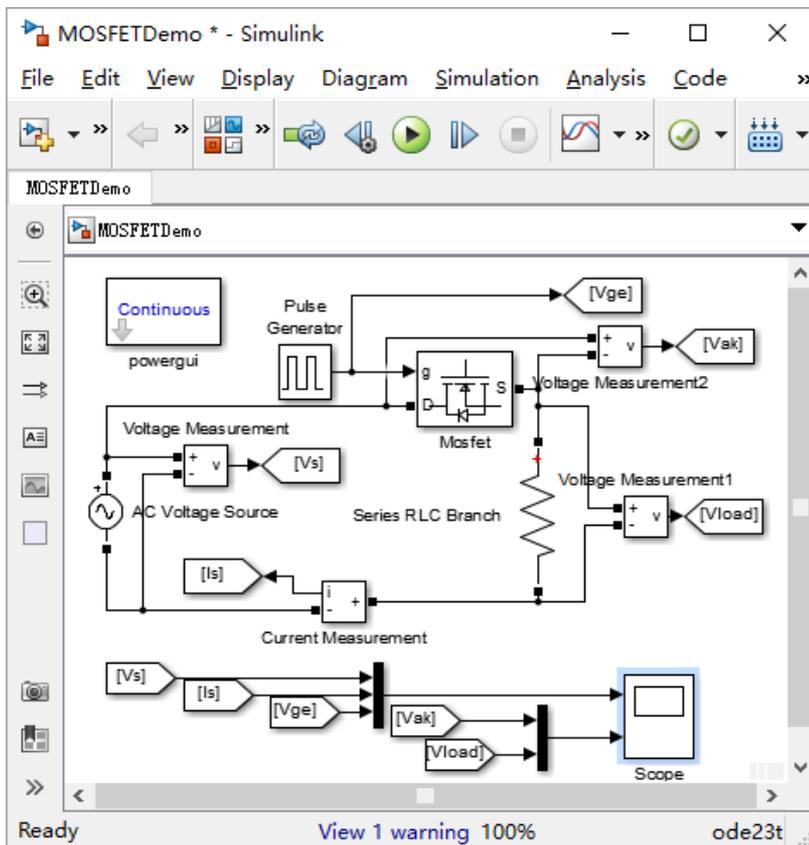
2.4.3 电力场效应晶体管

- MOSFET的开关速度和其输入电容 C_{in} 的充放电有很大关系。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，可以加快开关速度。
- 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。
- 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。



2.4.3 电力场效应晶体管

□ MOSFET仿真





2.4.3 电力场效应晶体管

□ 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。



2.4 典型全控型器件

2.4.1 门极可关断晶闸管

2.4.2 电力晶体管

2.4.3 电力场效应晶体管

2.4.4 绝缘栅双极晶体管



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

- ✓ **GTR**和**GTO**是双极型电流驱动器件，由于具有电导调制效应，其通流能力很强，但开关速度较低，所需驱动功率大，驱动电路复杂。
- ✓ 电力**MOSFET**是单极型电压驱动器件，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。
- ✓ 绝缘栅双极晶体管（Insulated-Gate Bipolar Transistor——IGBT或IGT）综合了GTR和MOSFET的优点，因而具有良好的特性。

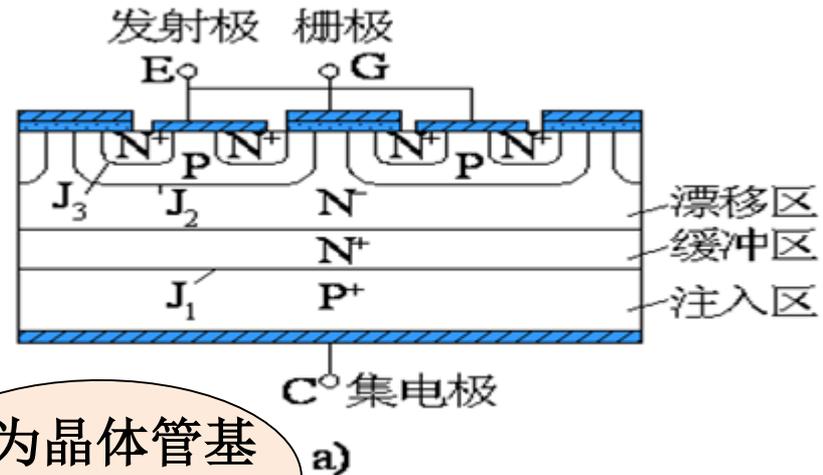
全控器件；电压驱动型；电平驱动型；复合型器件。

2.4.4 绝缘栅双极晶体管

□ 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**。



R_N 为晶体管基区内的调制电阻

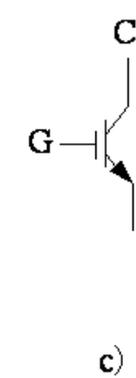
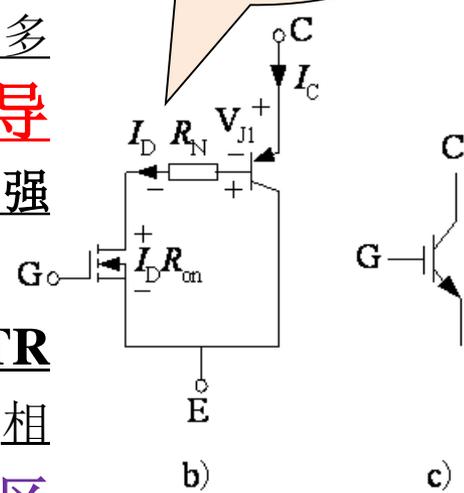
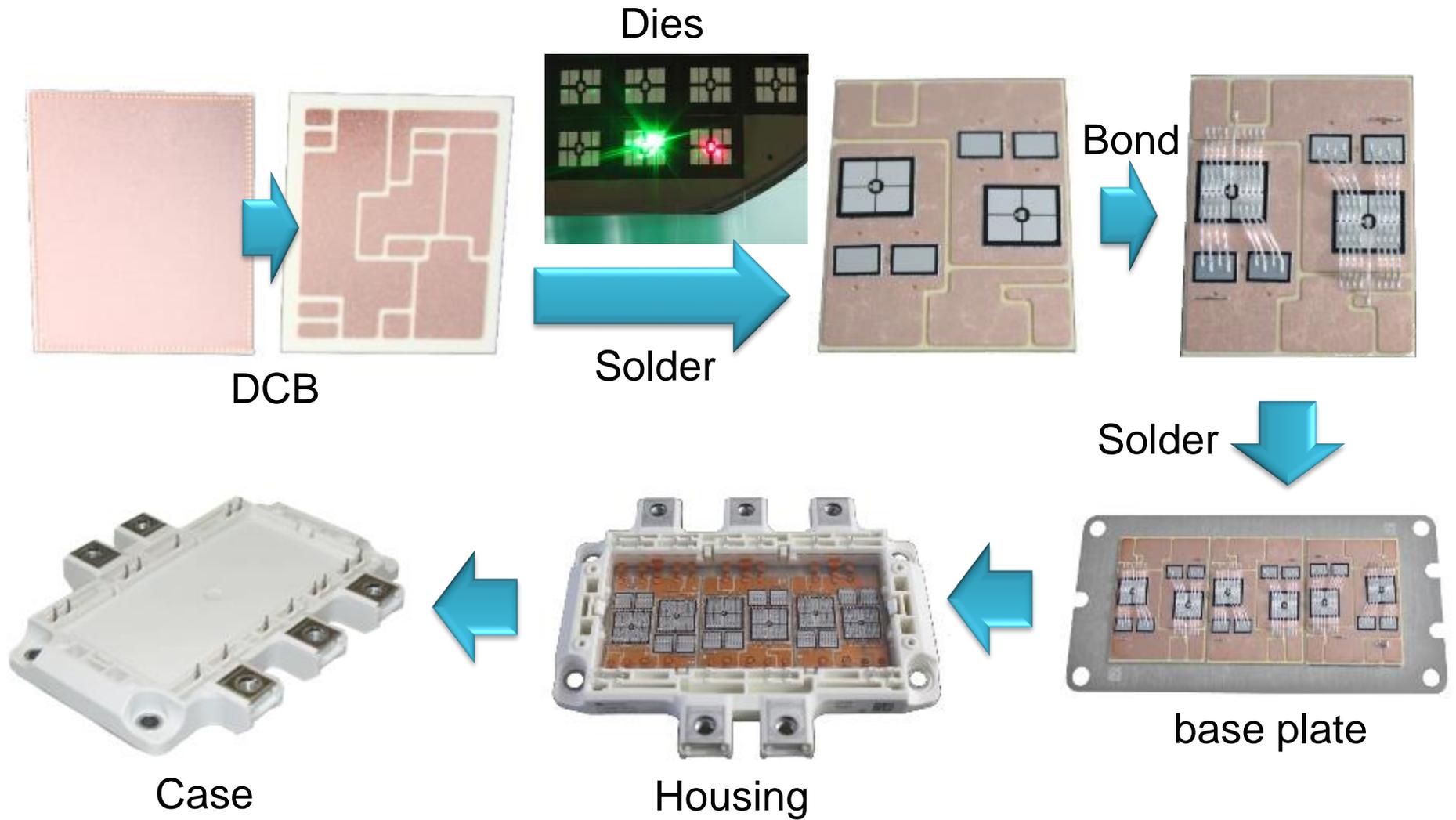


图2-23 IGBT的结构、简化等效电路和电气图形符号

- 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 模块生产组装流程

2.4.4 绝缘栅双极晶体管

◆ IGBT的工作原理

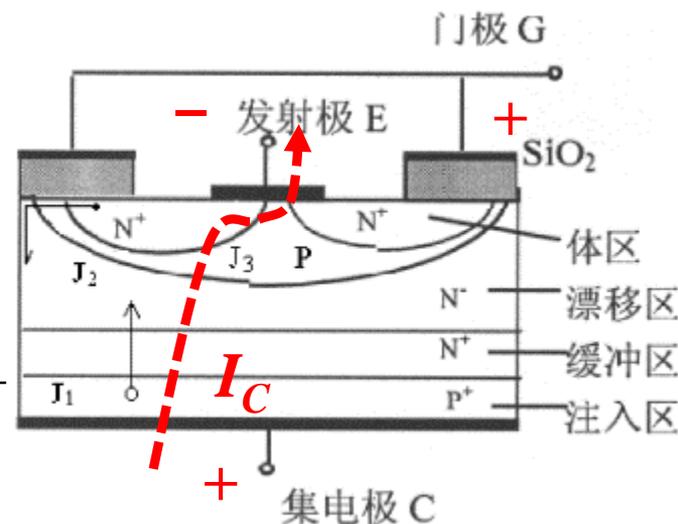
➤ IGBT的驱动原理与电力MOSFET基本相同，是一种场控器件。

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。



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

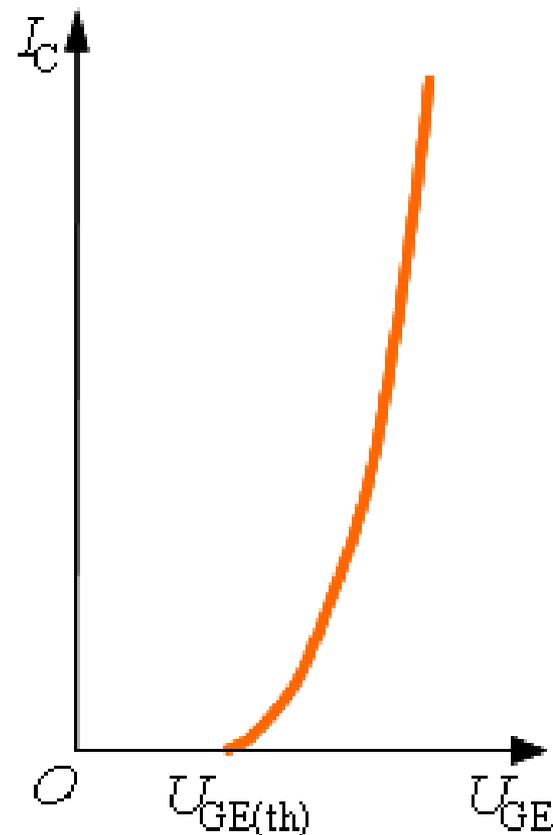
□ IGBT的基本特性

◆ 静态特性—伏安特性

➤ 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。

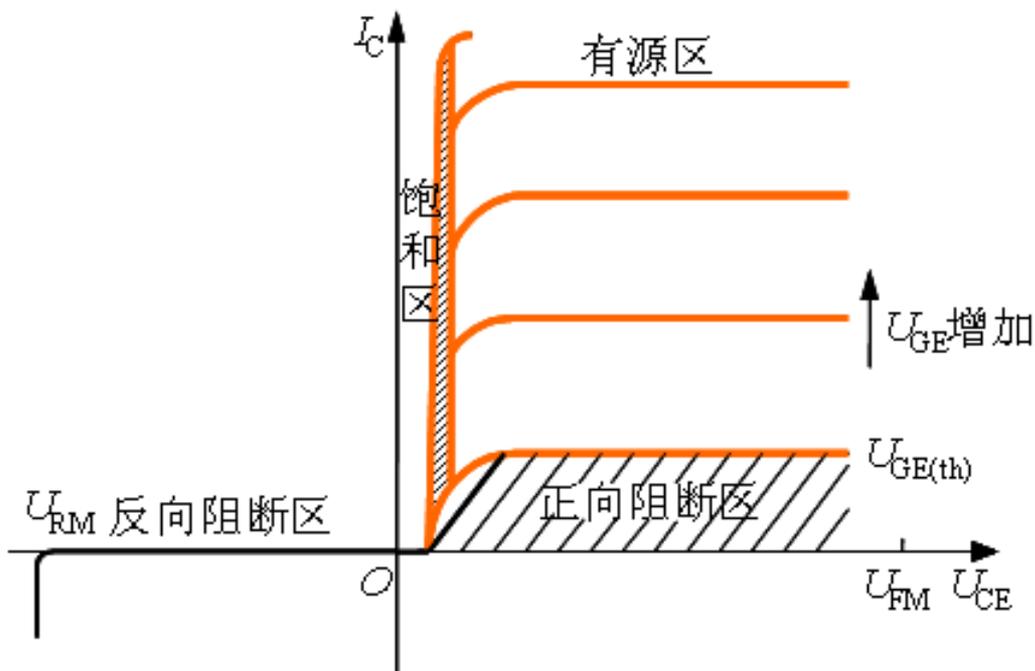
✓ 开启电压 $U_{GE(th)}$ 是IGBT能实现电导调制而导通的最低栅射电压，随温度升高而略有下降。



(a)

图2-24 IGBT的转移特性和输出特性
a) 转移特性

2.4.4 绝缘栅双极晶体管



(b)

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。

2.4.4 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。

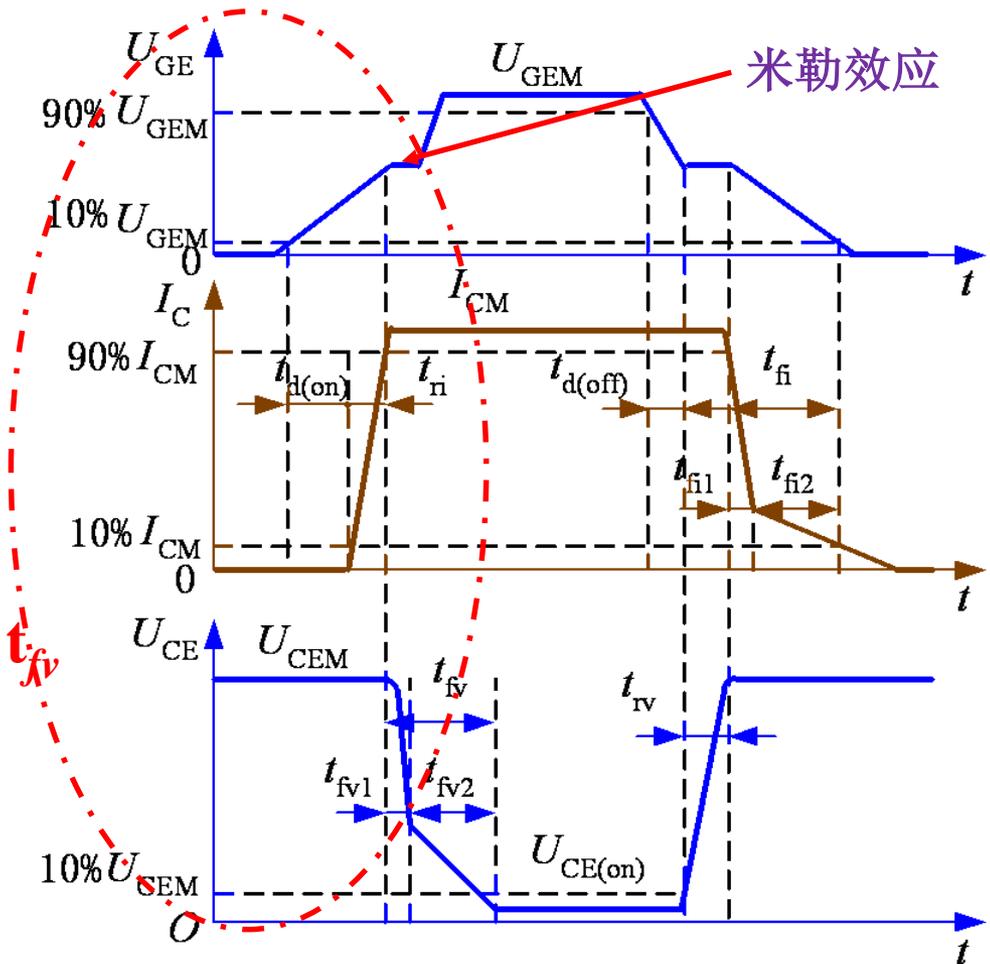


图2-25 IGBT的开关过程

2.4.4 绝缘栅双极晶体管

◆ 动态特性

➤ 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} 两段。

➤ 引入了**少子储存**现象，因而IGBT的开关速度要**低**于电力MOSFET。

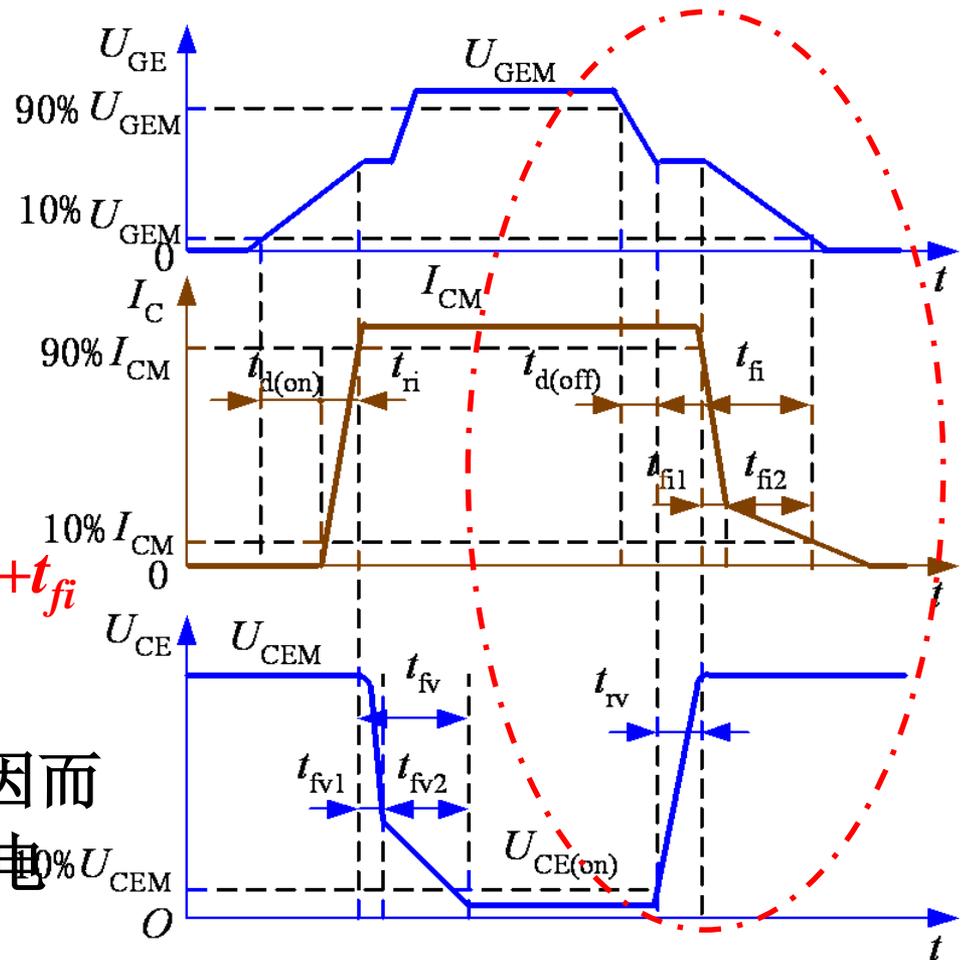
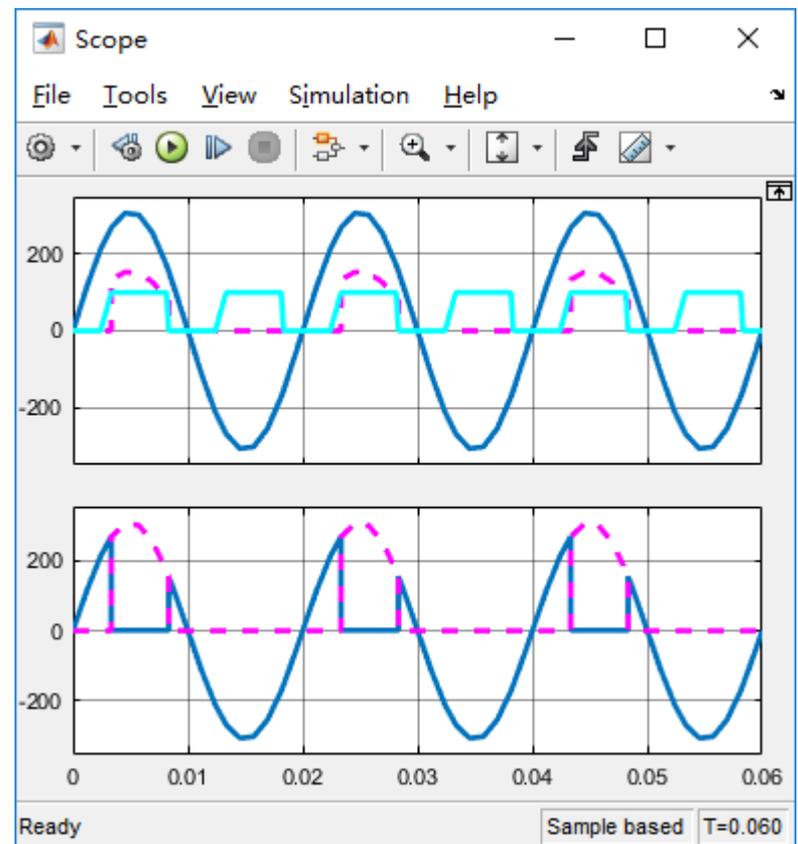
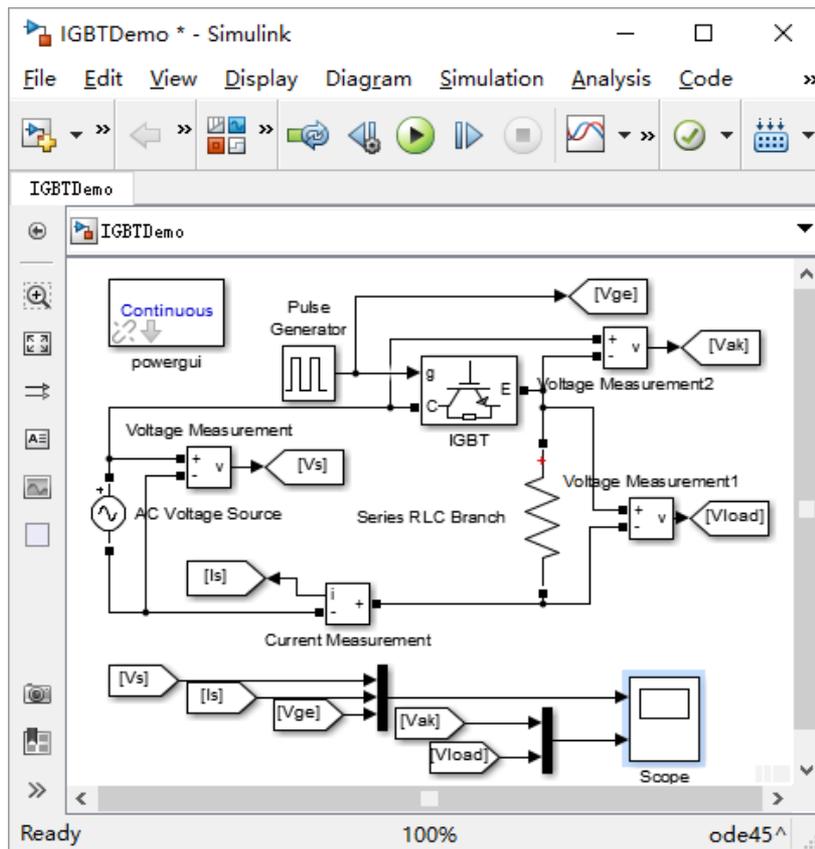


图2-25 IGBT的开关过程



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

□ IGBT仿真





2.4.4 绝缘栅双极晶体管

□ 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。



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

● IGBT的特性和参数特点可以总结如下：

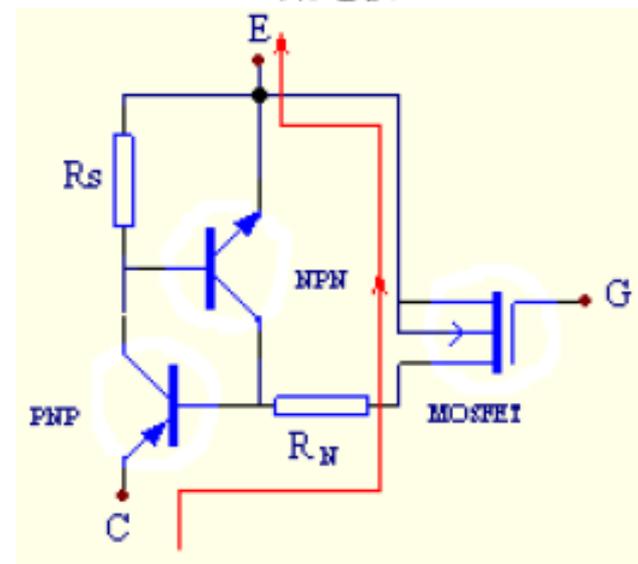
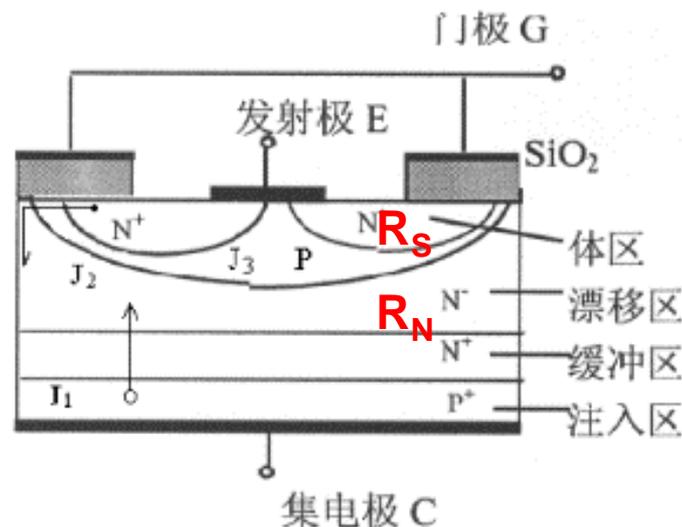
- ✓ 开关速度高，开关损耗小。
- ✓ 在相同电压和电流定额的情况下，IGBT的安全工作区比GTR大，而且具有耐脉冲电流冲击的能力。
- ✓ 通态压降比VDMOSFET低，特别是在电流较大的区域。
- ✓ 输入阻抗高，其输入特性与电力MOSFET类似。
- ✓ 与电力MOSFET和GTR相比，IGBT的耐压和通流能力还可以进一步提高，同时保持开关频率高的特点。

2.4.4 绝缘栅双极晶体管

□ IGBT的擎住效应和安全工作区

◆ IGBT的擎住效应

- 在IGBT内部寄生着一个N-PN⁺晶体管和作为主开关器件的P⁺N-P晶体管组成的寄生晶闸管。其中NPN晶体管的基极与发射极之间存在体区短路电阻R_s，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J₃结施加一个正向偏压，一旦J₃开通，栅极就会失去对集电极电流的控制作用，电流失控，这种现象称为擎住效应或自锁效应。





2.4.4 绝缘栅双极晶体管

- 引发擎住效应的原因，可能是集电极电流过大（静态擎住效应）， dU_{CE}/dt 过大（动态擎住效应），或温度升高。
- 动态擎住效应比静态擎住效应所允许的集电极电流还要小，因此所允许的最大集电极电流实际上是根据动态擎住效应而确定的。

◆ 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 确定。



第2章 电力电子器件

Chapter 2: Power Electronic Devices

2.1 电力电子器件概述

2.2 不可控器件——电力二极管

2.3 半控型器件——晶闸管

2.4 典型全控型器件

2.5 其他新型电力电子器件

2.6 功率集成电路与集成电力电子模块

本章小结

本章小结

□ 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等。

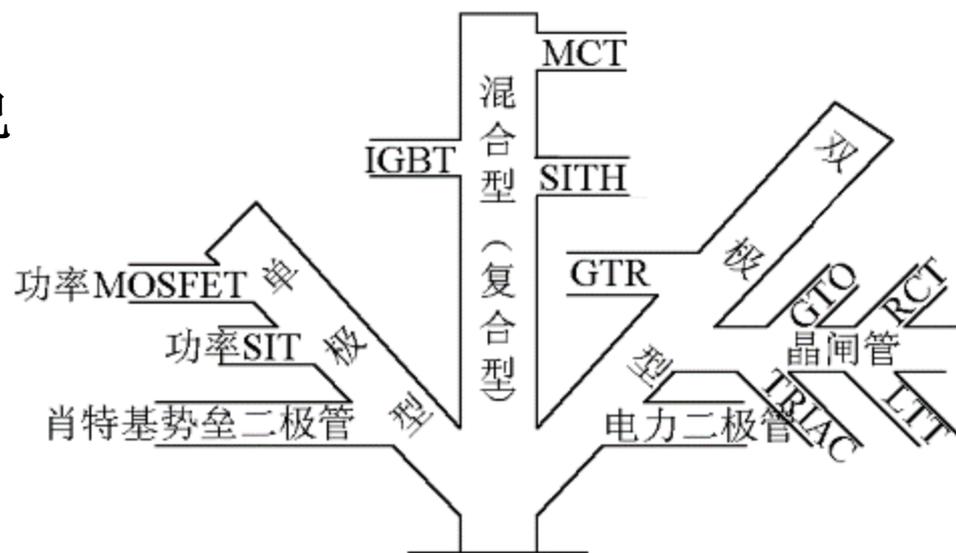


图2-26 电力电子器件分类“树”



本章小结

◆ 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）



本章小结

□ 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。



本章结束