



第4章 逆变电路

引言：

■ 问题的提出

- 当用直流电源向交流负载供电时，首先要解决将直流电变为交流电的问题
 - 将直流电变为交流电的技术称为“逆变”技术
 - 把逆变得到的交流电能馈送到交流电网：**有源逆变**
 - 将逆变得到的交流电能传送至负载：**无源逆变**
 - **逆变电路/逆变器 (Inverter)**：把直流电能变成交流电能的电路。
-

学习内容

4.1 换流方式

4.2 电压型逆变电路

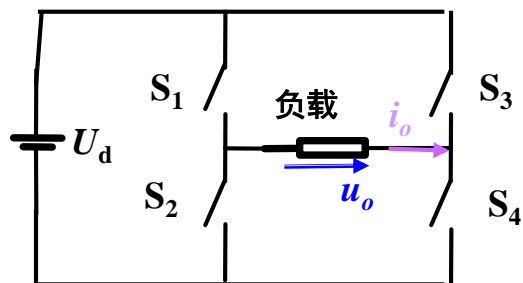
4.3 电流型逆变电路

4.4 多重逆变电路和多电平逆变电路

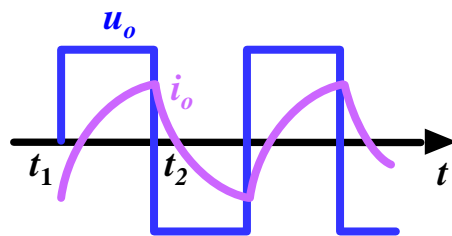


4.1 换流方式与典型全控型器件

4.1.1 逆变电路的结构与基本工作原理（负载性质：阻感）



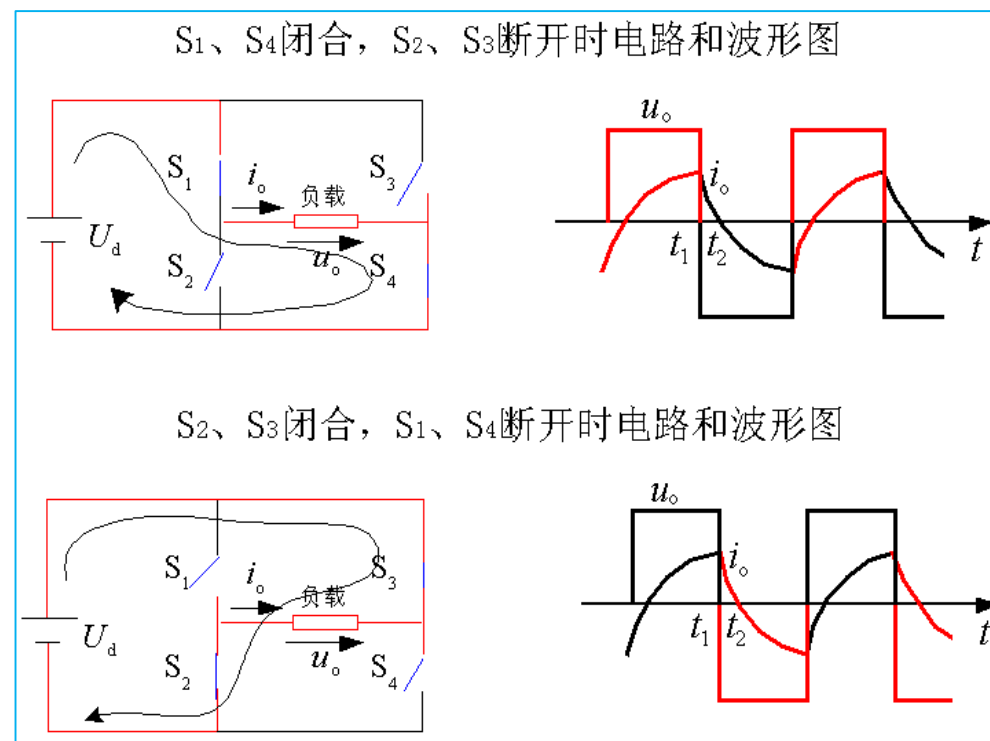
a)



b)

单相桥式逆变电路工作原理 a) 电路结构示意图 b) 负载电压、电流波形

- ❑ 直流（输入）侧：直流电压源 U_d ；交流（输出）侧：输出交流电压 u_o
- ❑ 逆变器(拓扑)：开关器件 $S_1 \sim S_4$ 及其支路。
- ❑ 逆变器输出波形：输出电压 u_o 波形：方波 $(+U_d, -U_d)$ ；输出电流 i_o 波形：方波（阻性负载）；指数（阻感负载）
- ❑ 改变两组开关切换频率，可改变输出交流电的频率。
- ❑ 思考： $S_1 \sim S_4$ ——二极管或晶闸管可以吗？——换流问题





4.1.2 换流方式分类

■ 换流——电流从一个支路向另一个支路转移的过程

□ 器件换流 (Device Commutation)

利用全控型器件的自关断能力进行换流。

在采用IGBT、电力MOSFET、GTO、GTR等全控型器件的电路中的换流方式属于器件换流

□ 电网换流 (Line Commutation)

电网提供换流电压的换流方式

将负的电网电压施加在欲关断的晶闸管上即可使其关断。不需要器件具有门极可关断能力，不需要为换流附加元件，但不适用于没有交流电网的无源逆变电路

□ 负载换流 (Load Commutation)

由负载提供换流电压的换流方式

负载电流的相位超前于负载电压的场合（电容性负载、同步发电机等），都可实现负载换流。



4.1.2 换流方式分类

❑ 负载换流 (Load Commutation)

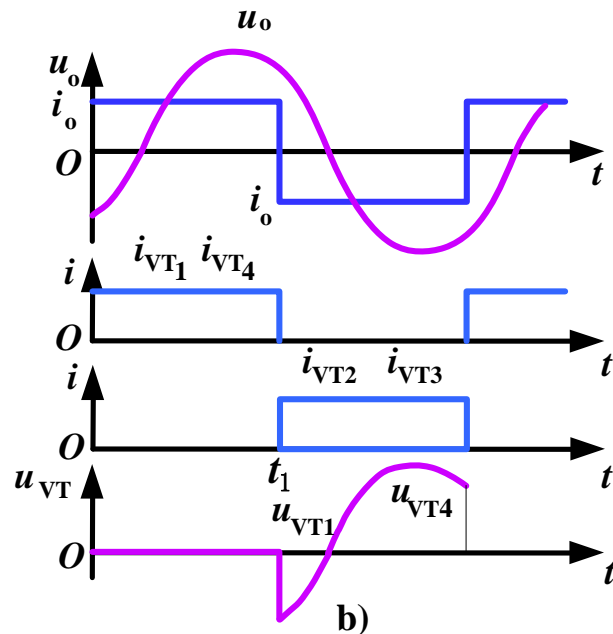
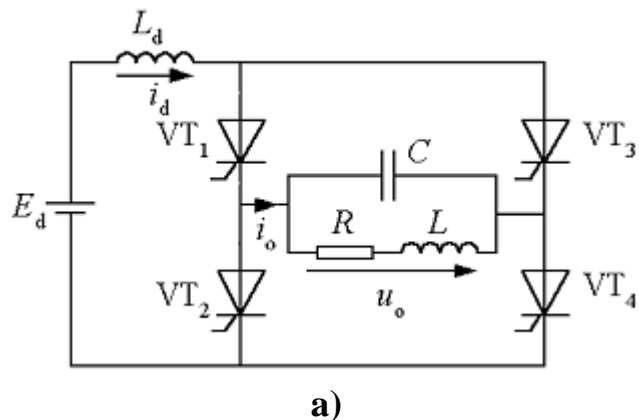


图4-2 负载换流电路及其工作波形

- ❑ 如图是基本的**负载换流**电路，4个桥臂均由晶闸管组成
- ❑ 直流侧串大电感，工作过程可认为 i_d 基本没有脉动
- ❑ 整个负载工作在接近并联谐振状态而略呈容性
- ❑ 负载对基波的阻抗大而对谐波的阻抗小，所以 u_o **接近正弦波**
- ❑ **注意：**触发 VT_2 、 VT_3 的时刻 t_1 必须在 u_o 过零前并留有足够的裕量，才能使换流顺利完成。



4.1.2 换流方式分类

强迫换流 (Forced Commutation)

设置附加的换流电路，给欲关断的晶闸管强迫施加反压或反电流的换流方式称为**强迫换流**。
通常利用附加电容上所储存的能量来实现，因此也称为**电容换流**。

由换流电路内电容直接提供换流电压



直接耦合式强迫换流

直接耦合式强迫换流

当晶闸管VT处于通态时，预先给电容充电。当S合上，就可使VT被施加反压而关断。也称**电压换流**。

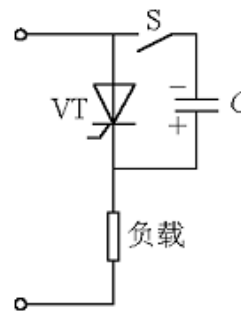


图4-3直接耦合式强迫换流原理图

通过换流电路内的电容和电感的耦合来提供换流电压或换流电流



电感耦合式强迫换流

电感耦合式强迫换流

先使晶闸管电流减为零，然后通过反并联二极管使其加上反向电压。也称**电流换流**。

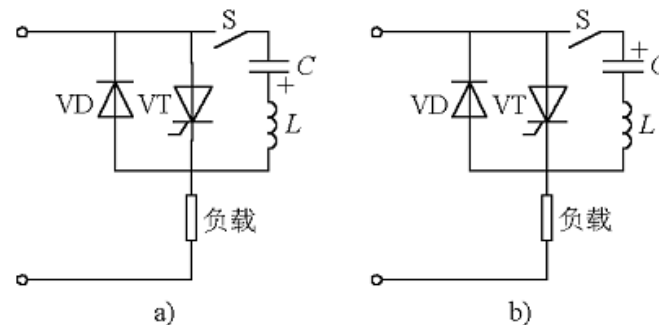


图4-4 电感耦合式强迫换流原理图

■ 从1960's开始，门极可关断晶闸管的问世，标志着电力电子开关器件由半控型向全控型发展。目前，全控型器件的性能已经能够基本满足逆变电路的需求，器件换流成为了逆变器换流的主流方式。



4.1.2 换流方式分类

■ 换流方式总结

- 器件换流——适用于全控型器件
 - 其余三种方式——针对晶闸管
 - 器件换流和强迫换流——属于自换流
 - 电网换流和负载换流——属于外部换流
 - 当电流不是从一个支路向另一个支路转移，而是在支路内部终止流通而变为零，则称为**熄灭**
- 从1960's开始，门极可关断晶闸管的问世，标志着电力电子开关器件由半控型向全控型发展
 - 目前，全控型器件的性能已经能够基本满足逆变电路的需求，器件换流成为了逆变器换流的主流方式。



2.4 典型全控型器件

■ 问题的提出

- 电力电子技术发展的第一个阶段：1950's — 1980's → **整流器时代**
- 第二阶段：1980's年代以来，全控型电力电子器件快速发展并走向成熟
- 全控型器件的出现推动了逆变技术的快速发展 → **逆变器时代**

■ 了解全控型电力电子器件

- 门极可关断晶闸管 GTO
- 电力晶体管 GTR
- 电力场效应晶体管 P-MOSFET
- 绝缘栅双极晶体管 IGBT
- 功率模块与智能功率模块 IPM

■ 学习要求

- 掌握电路符号、意义和在电能变换主电路中的接法
- 掌握开通和关断的条件
- 熟悉静态特性、动态特性
- 了解主要性能参数



2.4.1 门极可关断晶闸管



- 门极可关断晶闸管 GTO: Gate-Turn-Off Thyristor
- 属于晶闸管SCR的一种派生器件，但不同于SCR
- 全控型器件：可以通过给门极施加正或负的脉冲电流来控制器件导通或关断
- 具有普通晶闸管的优点：耐压高、电流大、耐浪涌能力强
- 优点：自关断能力、无须辅助关断电路，“性价比”较高
- 应用广泛：电力机车的逆变器、电网动态无功补偿和大功率直流斩波调速等领域。





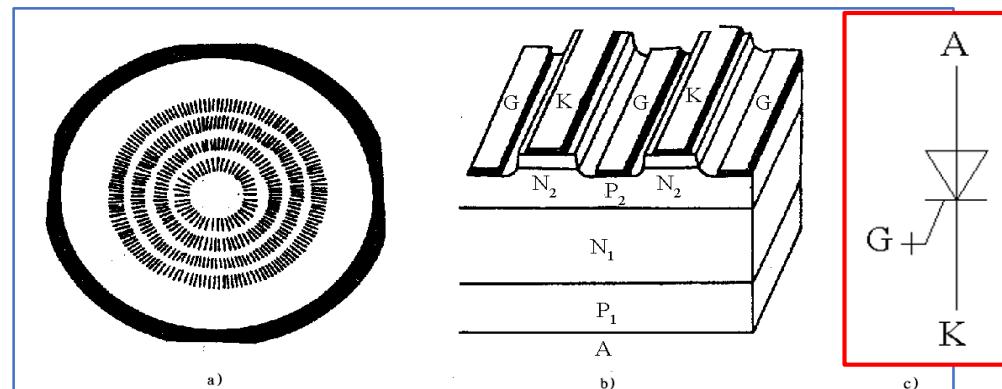
2.4.1 门极可关断晶闸管

■ GTO的结构

- PNPN四层半导体结构。
- 多元集成：数十、数百个共阳极的GTO元的阴极和门极在器件内部并联在一起。
- 多元集成的结构，使得通流容量大

■ GTO的主要特点

在承受阳极电压时，在门极-阴极回路注入正脉冲触发电流开通，门极-阴极回路施加负脉冲触发电流则器件关断，因而属于全控型器件。



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（阳极A，阴极K，门极G）



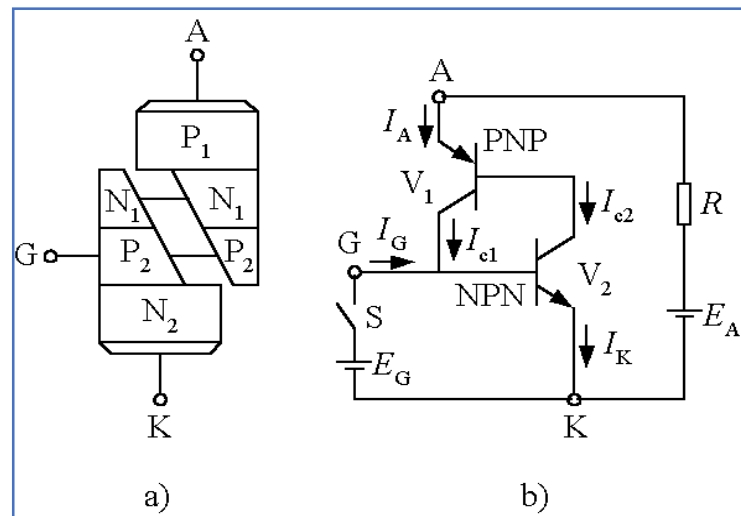
2.4.1 门极可关断晶闸管

■ GTO的工作原理

- α_1 、 α_2 : V_1 、 V_2 的共基极电流增益
- $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 是临界导通的条件, 大/小于1导通/关断
- 与普通晶闸管的不同之处
 - α_2 较大, 使晶体管 V_2 控制灵敏, 易于关断。
 - 导通时 $\alpha_1 + \alpha_2$ 更接近于1, 近临界饱和, 有利于门极控制关断, 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, 使从门极抽出较大电流成为可能
 - 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
 - 关断时, 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
 - GTO的多元集成结构使得其比普通晶闸管开通更快, 承受 di/dt 的能力更强。

与普通晶闸管比较:

尽管GTO与SCR的触发导通原理相同, 但二者的关断原理及关断方式截然不同。



普通晶闸管 (SCR) 的双晶体管模型及其工作原理

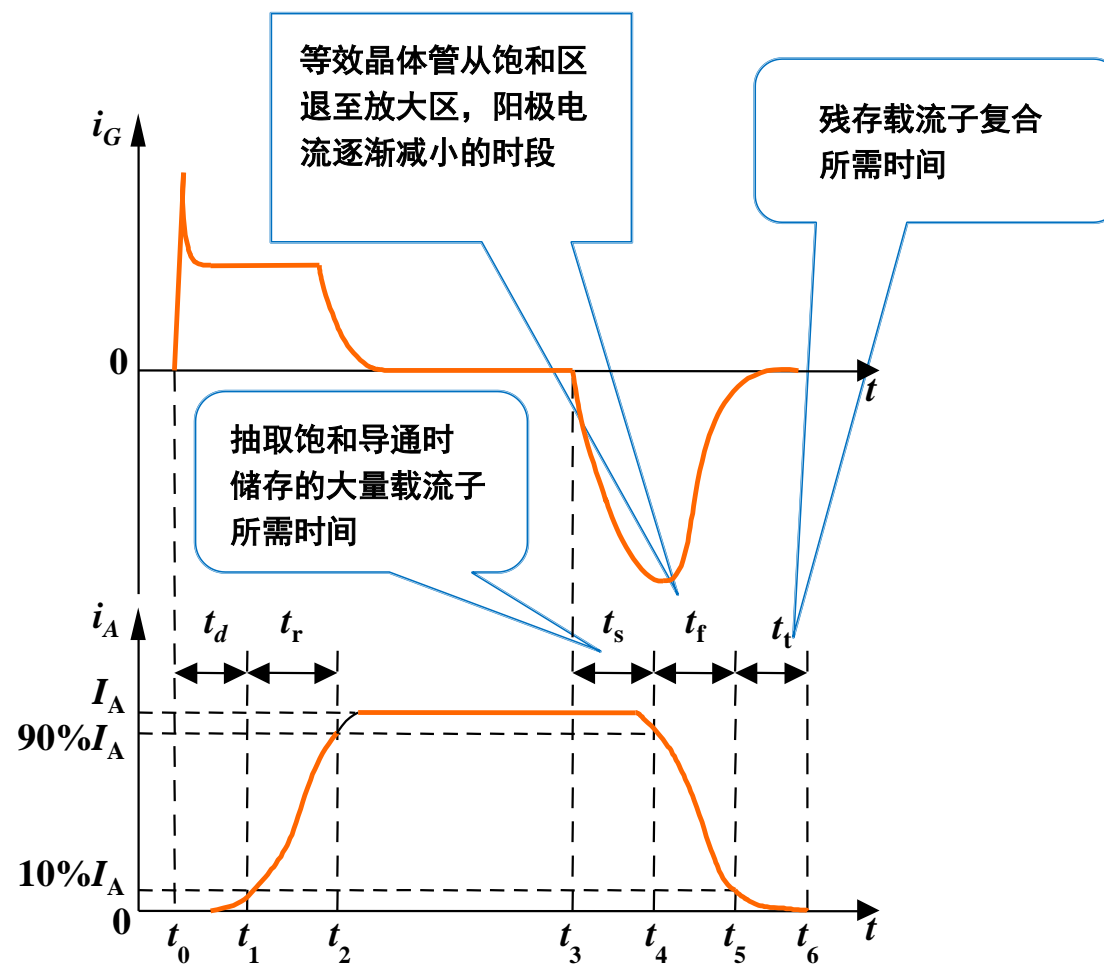
a) 双晶体管模型 b) 工作原理比较



2.4.1 门极可关断晶闸管

■ GTO的动态特性

- t_0 : 开通时刻; t_3 : 关断时刻
- 与晶闸管的开通过程相似——
 - t_d : 延迟时间; t_r : 上升时间
- 关断过程: 包括储存时间 t_s , 下降时间 t_f 和尾部时间 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。使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。



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的主要参数** 许多参数的意义都和普通晶闸管的相同。不同之处：

□ **最大可关断阳极电流 I_{ATO}** ：用来标称GTO**额定电流**

□ **电流关断增益 β_{off}** ： 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的主要不足

□ **开通时间 t_{on}** ：为延迟时间(1~2 μ s)与上升时间之和, 随通态阳极电流值的增大而增大

□ **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

□ **很多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的特点

- 当阳极和阴极间加正向电压且低于正向转折电压时，若门极无正向电压，则不会导通；若门极加正向电压，则被触发导通，导通后的管压降比较大，一般为 $2\sim 3\text{V}$
- 关断过程中，可在阳极电流下降的同时升高施加的阳极电压（不像普通单向晶闸管关断时在阳极电流等于零后才能施加阳极电压），因此，可关断晶闸管关断期间功耗较大
- 因为导通压降较大($2\sim 3\text{V}$)，门极触发电流较大（ 20mA 左右），所以导通功耗与门极功耗均较大。



2.4.1 门极可关断晶闸管

Description:

GTOs (Gate Turn-off Thyristors) are optimized for low conduction losses. The typical on-off switching frequency is in the range of 200 - 500 hertz for most applications. GTOs are, by nature, relatively slow switches. Typical transition times from on to off state and vice versa are in a range of 10 - 30 microseconds. All GTOs require protective networks called snubbers for turn-on and turn-off. The turn-on snubber circuit, in essence an inductor, limits the rate of current rise. For turn-off, the GTO requires a device that limits the rate of voltage rise, in essence a capacitor.

Some GTOs are press-pack devices. They are pressed with a relatively high force onto heat-sinks which also serve as electrical contacts to the power terminals.

Asymmetric GTOs are divided in two categories: Buffer layer and Standard. Buffer layer GTOs have exceptionally low on-state and dynamic losses. Fine pattern types (5SGF) are optimised for fast switching and transparent emitter (5SGT) for low on-state losses. The Standard GTOs have excellent trade-off between on-state and switching losses.

Parameters:

Gate Turn-off thyristor model: 5SGA 40L4501

$V_{\text{DRM}} = 4500 \text{ V}$; $I_{\text{TGQM}} = 4000 \text{ A}$; $V_{\text{T0}} = 2.1 \text{ V}$; $r_{\text{T}} = 0.58 \text{ m}\Omega$; $V_{\text{Dclink}} = 2800 \text{ V}$.

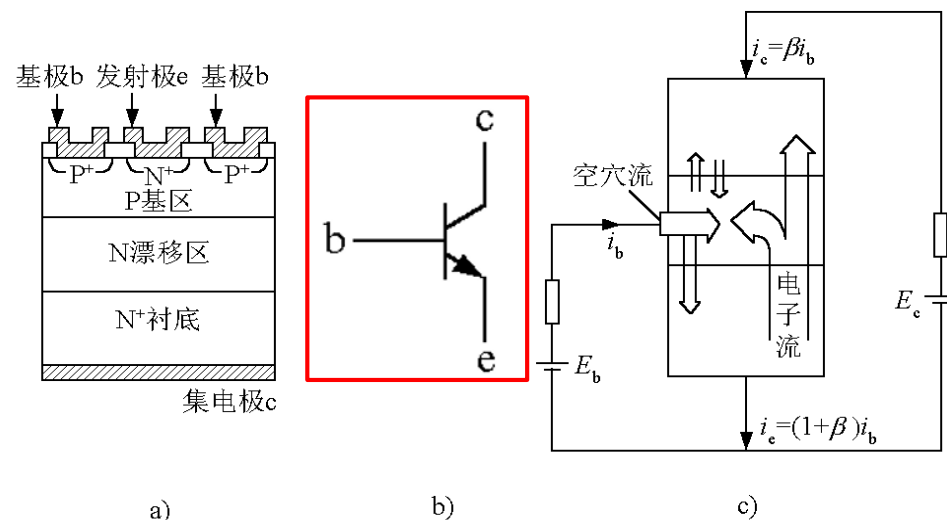


2.4.2 电力晶体管

■ 电力晶体管（Giant Transistor——GTR）

■ GTR的结构

- 由三层半导体（分别引出集电极c、基极b和发射极e）形成的两个PN结（集电结和发射结）构成
- 多采用NPN结构。应用中采用共发射极接法。
- 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起来，提高通流容量。
- 比“信息晶体管”多了一个漂移区（低参杂N区），以提高电压耐量。



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

+: 高参杂浓度; -: 低参杂浓度



2.4.2 电力晶体管

■ GTR的特点

- GTR的基本原理与“信息晶体管”是一样的。
- 与信息电子学中的晶体管相类似： $i_c = \beta i_b$ ， β 称为GTR的**电流放大系数**，反映**基极电流对集电极电流的控制能力**
- 考虑到集电极与发射极间存在的漏电流 i_{ce0} ， i_c 与 i_b 之间的关系为： $i_c = \beta i_b + i_{ce0}$
- 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。



2.4.2 电力晶体管

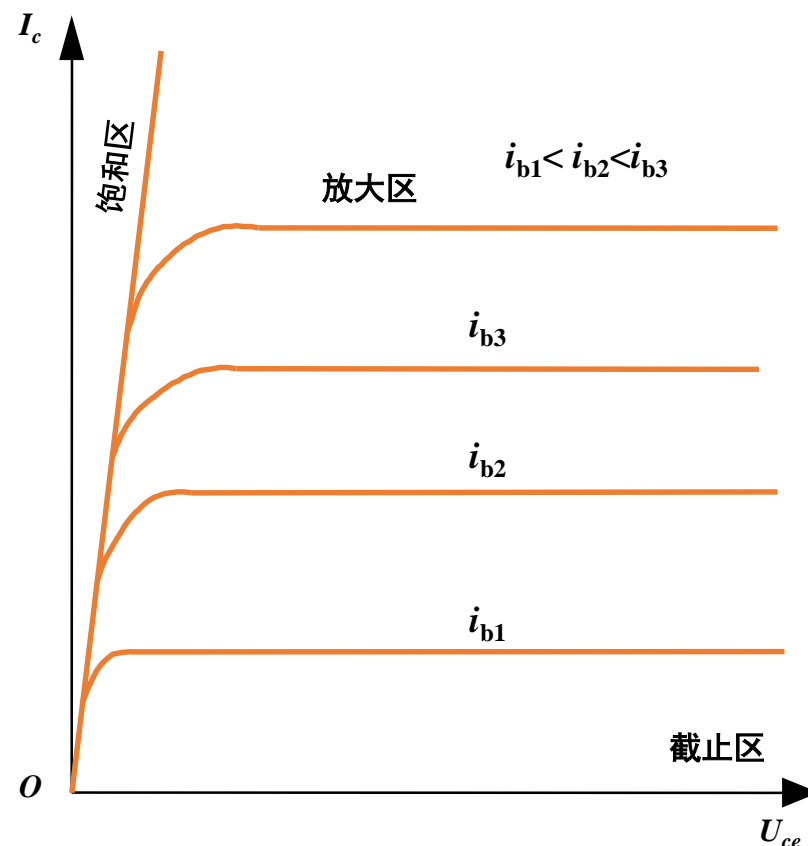
■ GTR的静态特性

共发射极接法时，静态特性由截止区、放大区和饱和区三部分组成

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

■ 思考：经过放大区的过程中，GTR的工作特点是什么？



共发射极接法时GTR的输出特性



2.4.2 电力晶体管

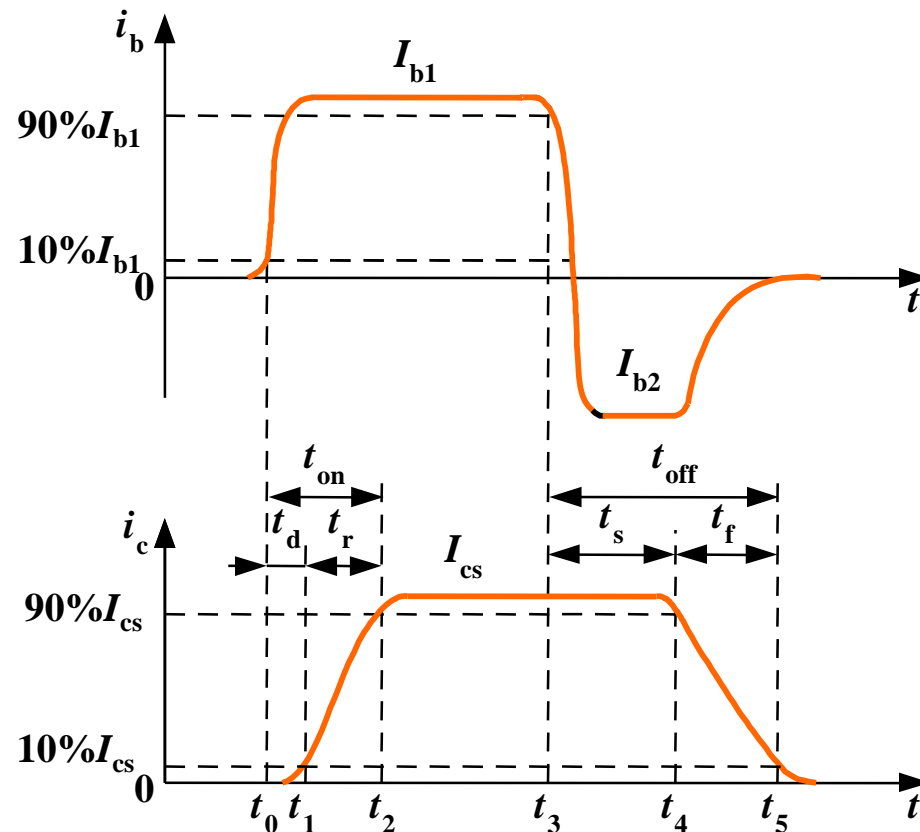
■ GTR的动态特性

☞ 开通过程

- 需要经过延迟时间 t_d 和上升时间 t_r ，开通时间 $t_{on} = t_d + t_r$ 。
- 延迟时间 t_d 主要是由发射结势垒电容和集电结势垒电容充电产生的。
- 增大 i_b 并增大 di_b/dt ，可以缩短 t_d ，同时也可以缩短 t_r ，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} 。
- 储存时间 t_s 是用来除去饱和导通时储存在基区的载流子的，是关断时间的主要部分。
- 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SCR和GTO短很多。



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 与 直流电流增益 h_{FE}
- 集电极与发射极间漏电流 I_{ceo} 与集电极和发射极间饱和压降 U_{ces}
- 开通时间 t_{on} 与关断时间 t_{off}
- 最高工作电压: $BU_{cbo} > BU_{cex} > BU_{ces} > BU_{cer} > Bu_{ceo}$
- 集电极最大允许电流 I_{CM}
 - ✎ 规定直流电流放大系数 h_{FE} 下降到规定的 $1/2 \sim 1/3$ 时所对应的 I_c 。
 - ✎ 实际使用时只能用到 I_{CM} 的一半或稍多一点。
- 集电极最大耗散功率 P_{CM}
 - ✎ 指在最高工作温度下允许的耗散功率。
 - ✎ 产品说明书中在给出 P_{CM} 时总是同时给出壳温 T_C ，间接表示了最高工作温度。

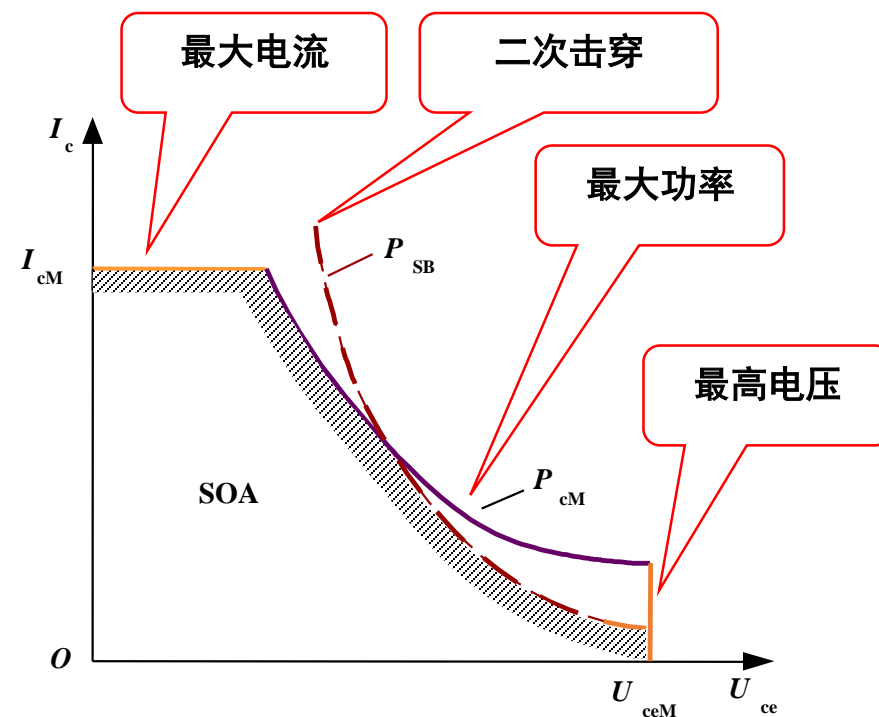


2.4.2 电力晶体管

■ GTR的二次击穿现象与安全工作区 SOA

(Safe Operating Area)

- 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。
- 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**。



GTR的安全工作区



2.4.3 电力场效应晶体管

■ 电力MOSFET (Power MOSFET)

■ 分为**结型**和**绝缘栅型**两类，但通常指绝缘栅型中的MOS型 (Metal Oxide Semiconductor FET)

■ 由**栅极**电压来控制**漏极**电流，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。
- ◆ 电流容量小，耐压低，多用于功率不超过10kW的电力电子装置。



2.4.3 电力场效应晶体管

■ 电力MOSFET的结构

■ 小功率MOS管：

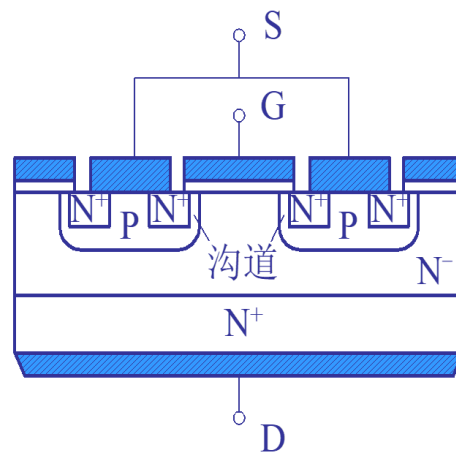
□ 横向导电

■ 电力MOSFET：

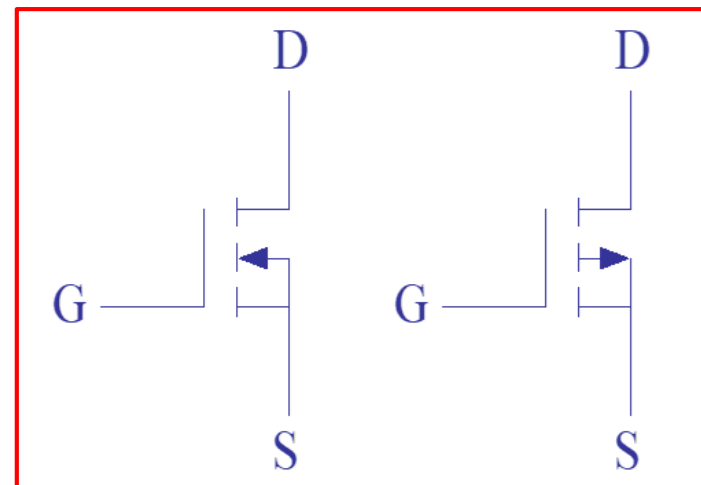
□ 垂直导电；多元集成结构；

□ VMOSFET；耐压和通流容量提高；

□ 漏极D；源极S；栅极G



a)



b)

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

✎ 按导电沟道不同可分为**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**。



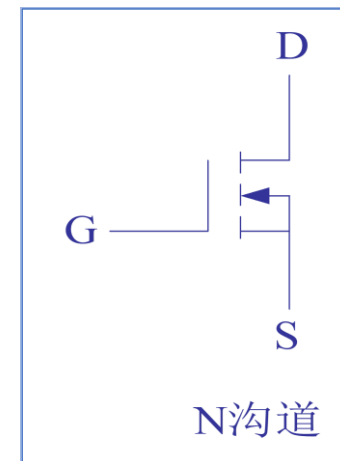
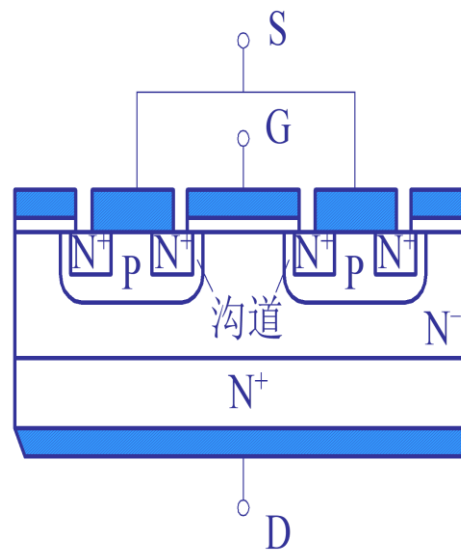
2.4.3 电力场效应晶体管

◆电力MOSFET的工作原理

✎断态：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结反偏，漏源极之间无电流流过。

✎通态：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区中的少子——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

■ 静态特性

□ 转移特性

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

$$G_{fs} = dI_D / dU_{GS}$$

电压控制型器件输入阻抗极高，输入电流很小。

□ 输出特性

截止区（对应GTR的截止区）；饱和区（对应放大区）；

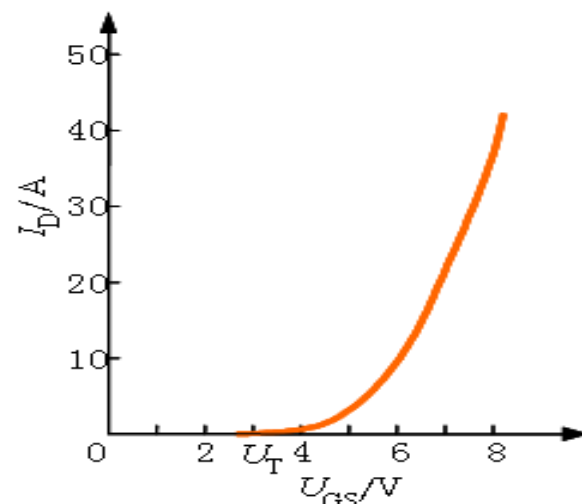
非饱和区（对应饱和区）

饱和漏源电压增加时漏极电流不再增加；非饱和指漏源电压增加时漏极电流增加。

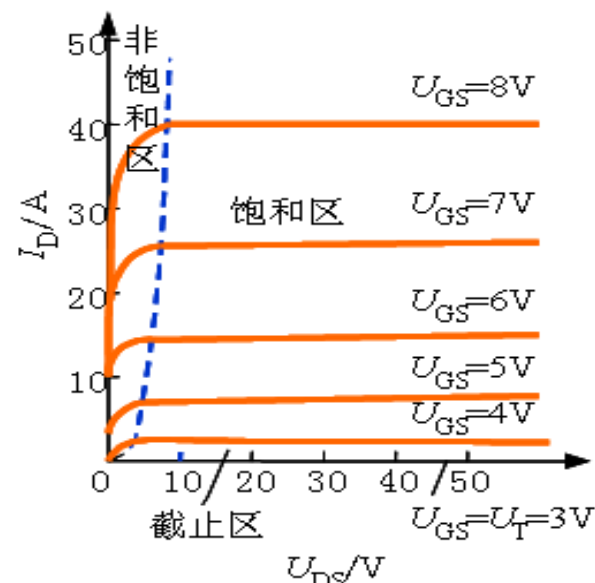
工作在开关状态，即在截止区或非饱和区！

本身结构使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。因此多有并联应用。



a) 转移特性

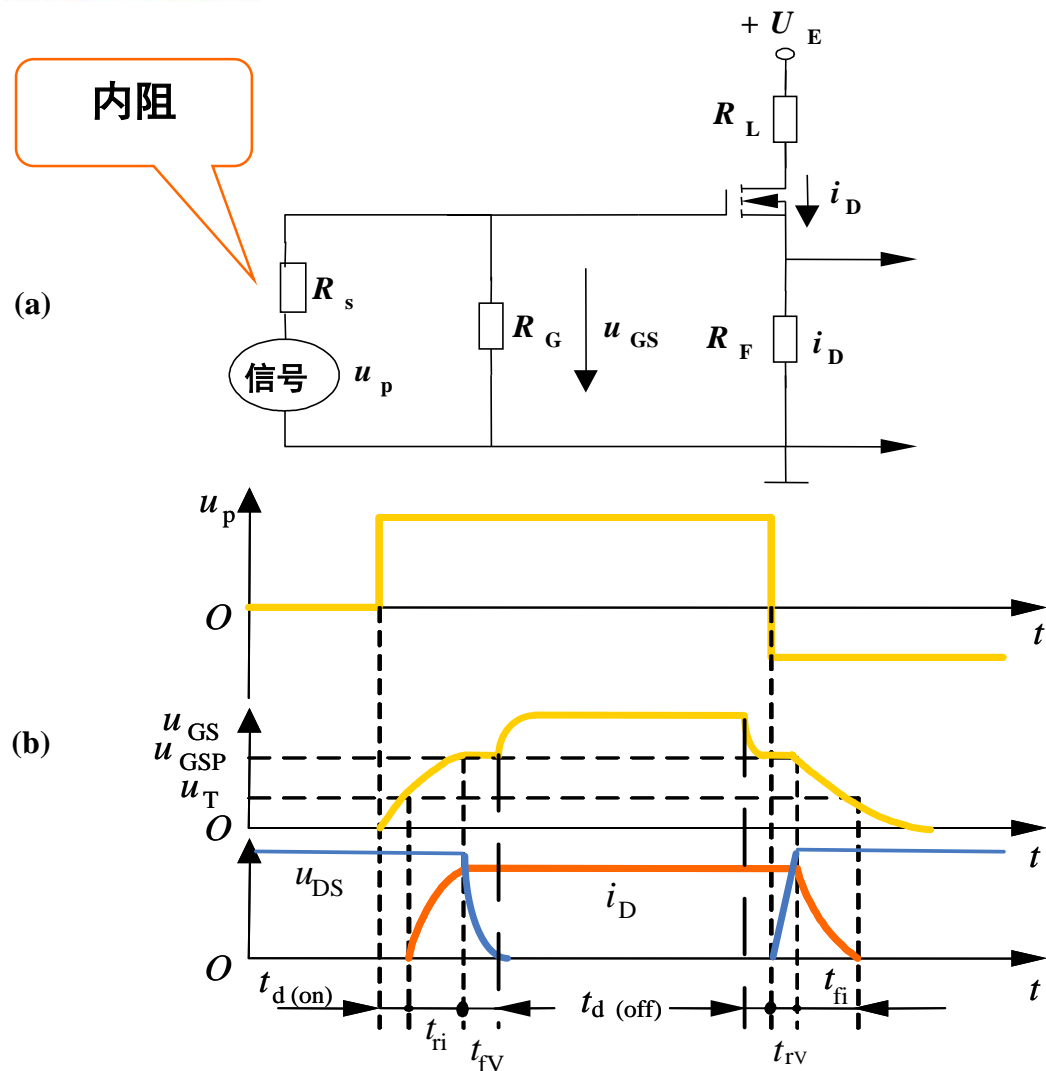


b) 输出特性



2.4.3 电力场效应晶体管

■ 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} ；

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

□ 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} ；

$$\text{关断时间 } t_{off} = t_{d(off)} + t_{rv} + t_{fi}$$

TIP: 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。

特点：单极型器件——无少子储存效应→关断迅速
工作频率高→100kHz以上
输入级为容性→驱动功率小

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

■ 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。



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

- 绝缘栅双极型晶体管 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 的问世
- 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→提出需求：开通所需电流小
- 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，但通态压降大，输出电流小→提出需求：通态压降小，输出电流大
- IGBT是由MOS管（输入级）和三极管（输出级）组成的复合型电压驱动式全控型功率半导体器件
- 输入级为MOSFET，输出级为GTR，它融合了这两种器件的优点，既具有电压驱动型器件驱动功率小和开关速度快的优点，又具有双极型器件饱和压降低而电压电流容量大的优点
- IGBT器件构成的指导思想给我们的启示：集成创新。

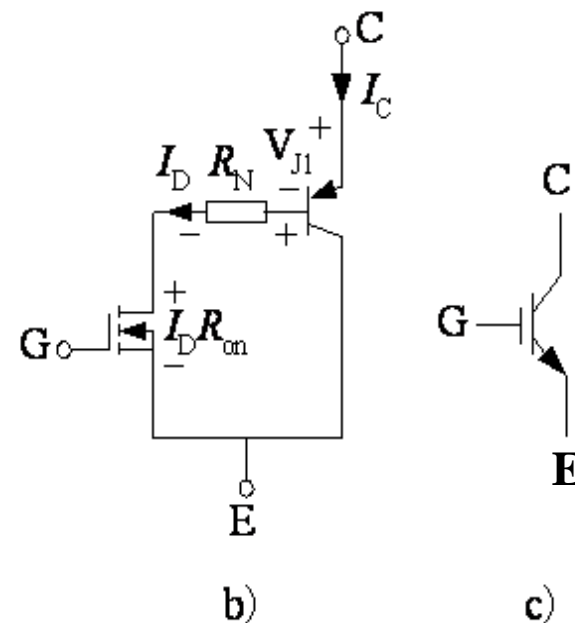
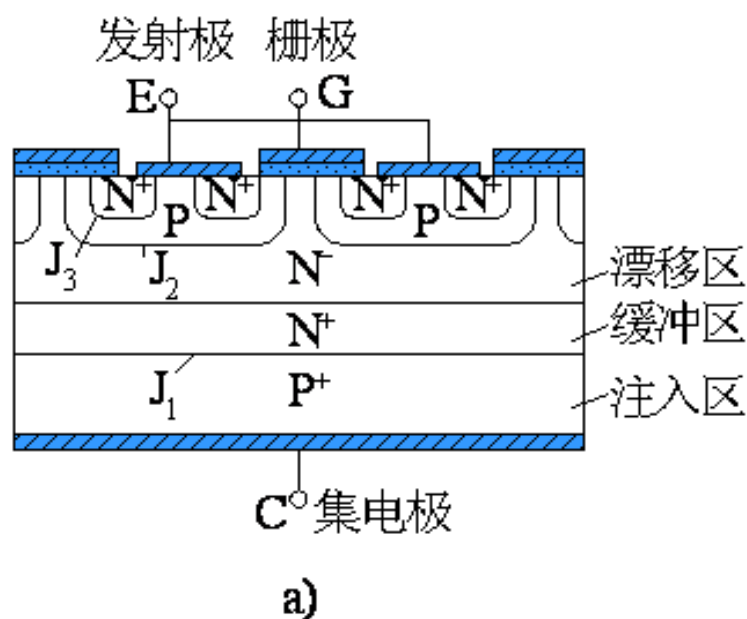


2.4.4 绝缘栅双极晶体管

IGBT的结构

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



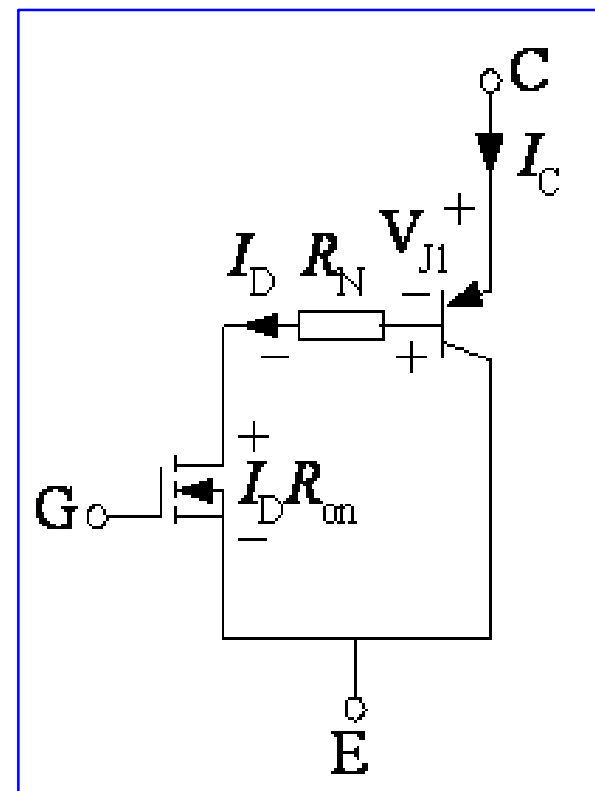
- 三端器件:栅极G、集电极C和发射极E
- 由N沟道VDMOSFET与双极型晶体管组合而成的IGBT，比VDMOSFET多一层P⁺注入区，实现对漂移区电导率进行调制，使得IGBT具有很强的通流能力
- 简化等效电路表明，IGBT是用GTR与MOSFET组成的达林顿结构，相当于一个由MOSFET驱动的厚基区PNP晶体管。



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

■ IGBT的工作原理

- ❑ 驱动原理与电力MOSFET基本相同，属于**电压控制型**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。



❑ 开通过程: $U_{GE} > 0 \Rightarrow$ 开启电压 $U_{GE(th)}$ \Rightarrow MOSFET内形成沟道 \Rightarrow 为晶体管提供基极电流 \Rightarrow 导通

❑ 关断过程: $U_{GE} \leq 0 \Rightarrow$ 施加反向电压或不加信号 \Rightarrow 沟道消失 \Rightarrow 基极电流被切断 \Rightarrow 关断



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

■ IGBT的静态特性

□ 转移特性

描述集电极电流 I_C 与栅射电压 U_{GE} 之间的关系。

开启电压 $U_{GE(th)}$ ——最低栅射电压

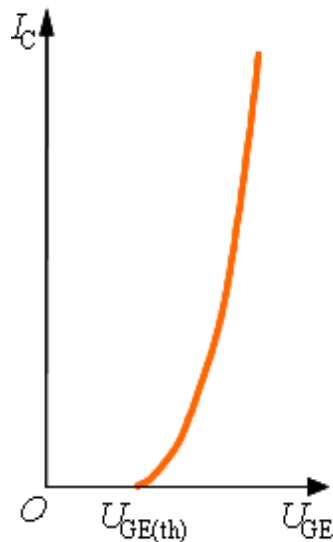
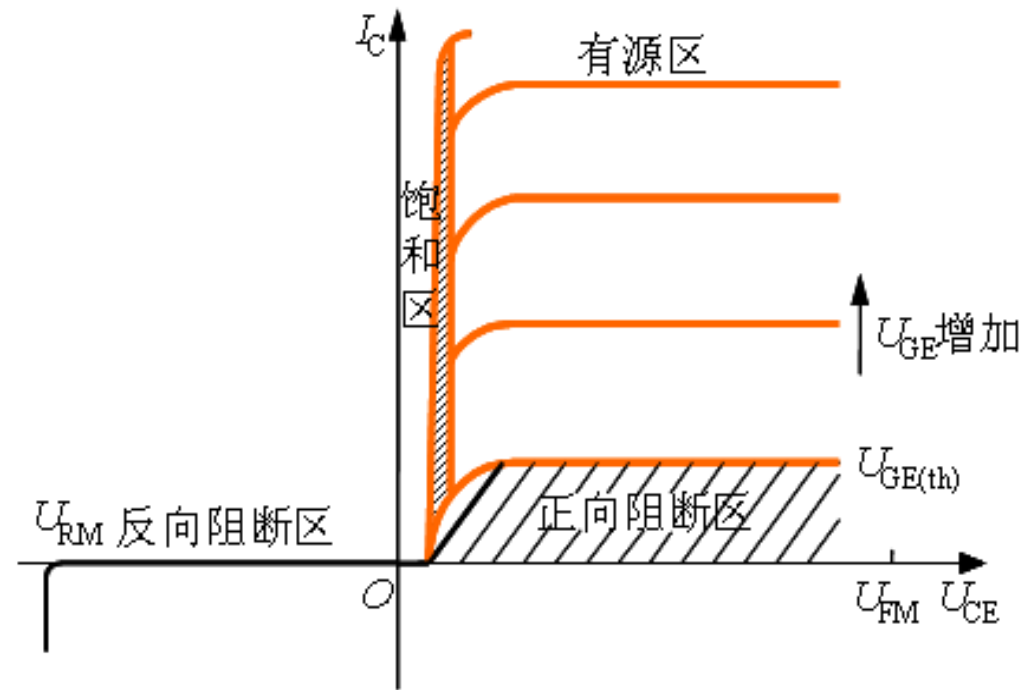


图2-24 (a)
IGBT的转移特性



(b) IGBT的输出特性

□ 输出特性（伏安特性）

反映了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

工作在开关状态：在正向阻断区和饱和区之间转换。



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

■ IGBT的动态特性（开关特性）

□ 开通过程

- ☞ 包括开通延迟时间 $t_{d(on)}$ ，电流上升时间 t_{ri} 和电压下降时间 t_{fv}
- ☞ t_{fv} 分为 t_{fv1} 和 t_{fv2} 两段
- ☞ （总）开通时间： $t_{on} = t_{d(on)} + t_{ri} + t_{fv}$

□ 关断过程

- ☞ 包括关断延迟时间 $t_{d(off)}$ ，电压上升时间 t_{rv} 和电流下降时间 t_{fi}
- ☞ t_{fi} 分为 t_{fi1} 和 t_{fi2} 两段
- ☞ （总）关断时间 $t_{off} = t_{d(off)} + t_{rv} + t_{fi}$

- 引入了少子储存现象，因而IGBT的开关速度要低于电力MOSFET。

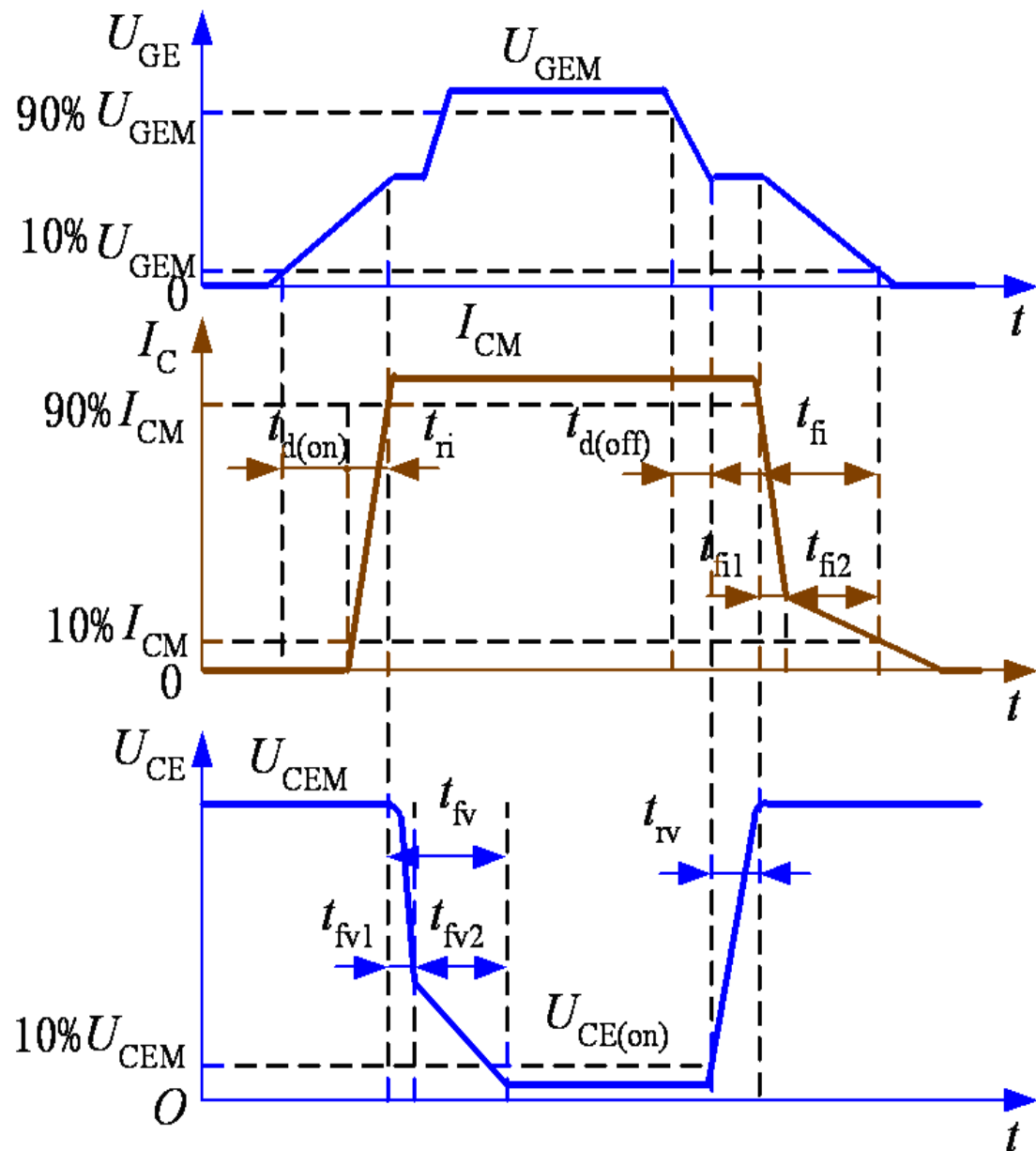


图2-25 IGBT的开关过程



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

■ IGBT的主要参数

- ◆ 最大集射极间电压 U_{CES} —— 击穿电压最高耐量
- ◆ 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
- ◆ 还包括开通时间 t_{on} 和关断时间 t_{off}

■ IGBT的安全工作区

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

由最大集电极电流、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)

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



2.4.4 绝缘栅双极晶体管

■ IGBT的特性和参数特点

- 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在**现代电力电子技术**中得到了越来越广泛的应用，在较高频率的大、中功率应用中占据了主导地位
- 目前为止，IGBT的核心技术和产业为大多数欧美半导体厂商所掌控。
- **但是，中国在2014年6月成功研制出8寸IGBT专业芯片，打破了国际垄断！**



	普通晶闸管 SCR	可关断晶闸管 GTO	电力晶体管 GTR	电力场效应晶体管 Power MOSFET	绝缘栅双极晶体管 IGBT
电气图形符号					
	阳极A 阴极K 门极G	阳极A 阴极K 门极G	集电极c 基极b 发射极e	漏极D 源极S 栅极G	栅极G 集电极C 发射极E
内部结构					



	普通晶闸管 SCR	可关断晶闸管 GTO	电力晶体管 GTR	电力场效应晶体管 Power MOSFET	绝缘栅双极晶体管 IGBT
--	--------------	---------------	--------------	--------------------------	------------------

静态特性					
------	--	--	--	--	--

动态特性					
------	--	--	--	--	--



	普通晶闸管 SCR	可关断晶闸管 GTO	电力晶体管 GTR	电力场效应晶体管Power MOSFET (PM)	绝缘栅双极晶体管 IGBT
开通与关断条件	<p>当晶闸管承受反向阳极电压时，不论门极是否有触发电流，晶闸管都不会导通。</p> <p>当晶闸管承受正向阳极电压时，仅在门极有触发电流的情况下才能开通。</p> <p>晶闸管一旦导通，门极失去控制作用</p> <p>若要使已导通的晶闸管关断，只能使流过晶闸管的阳极电流降到维持电流以下</p>	<p>当GTO承受反向阳极电压时，不论门极是否有触发电流，GTO都不会导通。</p> <p>GTO承受正向阳极电压时，仅在门极有触发电流的情况下GTO才能开通。</p> <p>GTO不能承受反向阳极电压。只能外加反向门极电流使处于通态的GTO关断。</p>	<p>开通条件：集电极和发射极之间施加正向电压的同时，注入正向基极电流。</p> <p>关断条件：基极注入反向电流。</p>	<p>漏源之间加正向电压的同时，在栅源之间施加高于开启电压的正向电压，可使PM开通；</p> <p>PM处于开通状态下，栅源之间施加零电压或反向电压，PM关断。</p>	<p>集电极与发射极之间加正向电压的同时，在栅射之间施加高于开启电压的正向电压，可使IGBT开通；</p> <p>当集电极与发射极之间加反向电压时，IGBT处于反向阻断状态；</p> <p>当IGBT处于开通状态下，栅射之间施加零电压或一定的反向电压，IGBT关断。</p>



	普通晶闸管 SCR	可关断晶闸管 GTO	电力晶体管 GTR	电力场效应晶体管 Power MOSFET	绝缘栅双极晶体管 IGBT
主要技术参数	<ul style="list-style-type: none">❑ 断态/反向重复峰值电压 $U_{\text{DRM}} / U_{\text{RRM}}$: 允许重复加在器件上的正向 / 反向峰值电压❑ 取 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小者对应的标准值作为额定电压❑ 维持电流 I_{H} 使晶闸管维持导通所必需的最小阳极电流	<ul style="list-style-type: none">❑ 最大可关断阳极电流 I_{ATO} : 用来标称GTO额定电流。❑ 电流关断增益 β_{off} : I_{ATO} 与门极负脉冲电流最大值 I_{GM} 之比。	<ul style="list-style-type: none">❑ 电流放大倍数 β 与 直流电流增益 h_{FE}❑ 最高工作电压: BU_{cb}❑ 集电极最大允许电流 I_{CM}	<ul style="list-style-type: none">❑ 漏极电压 U_{DS} 标称电力MOSFET电压定额的参数。❑ 标称电力MOSFET电流定额的参数: 漏极直流电流 I_{D} 和漏极脉冲电流幅值 I_{DM}	<ul style="list-style-type: none">❑ 最大集射极间电压 U_{CES} —— 击穿电压最高耐量❑ 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



Thank you