

IGBT 的工作原理和工作特性

IGBT 的工作原理和工作特性

IGBT 的开关作用是通过加正向栅极电压形成沟道，给 PNP 晶体管提供基极电流，使 IGBT 导通。反之，加反向门极电压消除沟道，流过反向基极电流，使 IGBT 关断。IGBT 的驱动方法和 MOSFET 基本相同，只需控制输入极 N 沟道 MOSFET，所以具有高输入阻抗特性。当 MOSFET 的沟道形成后，从 P+基极注入到 N 一层的空穴（少子），对 N 一层进行电导调制，减小 N 一层的电阻，使 IGBT 在高电压时，也具有低的通态电压。

IGBT 的工作特性包括静态和动态两类：

1. 静态特性

IGBT 的静态特性主要有伏安特性、转移特性和开关特性。IGBT 的伏安特性是指以栅源电压 U_{gs} 为参变量时，漏极电流与栅极电压之间的关系曲线。输出漏极电流比受栅源电压 U_{gs} 的控制， U_{gs} 越高， I_d 越大。它与 GTR 的输出特性相似。也可分为饱和区 1、放大区 2 和击穿特性 3 部分。在截止状态下的 IGBT，正向电压由 J2 结承担，反向电压由 J1 结承担。如果无 N+缓冲区，则正反向阻断电压可以做到同样水平，加入 N+缓冲区后，反向关断电压只能达到几十伏水平，因此限制了 IGBT 的某些应用范围。

IGBT 的转移特性是指输出漏极电流 I_d 与栅源电压 U_{gs} 之间的关系曲线。它与 MOSFET 的转移特性相同，当栅源电压小于开启电压 $U_{gs(th)}$ 时，IGBT 处于关断状态。在 IGBT 导通后的大部分漏极电流范围内， I_d 与 U_{gs} 呈线性关系。最高栅源电压受最大漏极电流限制，其最佳值一般取为 15V 左右。IGBT 的开关特性是指漏极电流与漏源电压之间的关系。IGBT 处于导通态时，由于它的 PNP 晶体管为宽基区晶体管，所以其 β 值极低。尽管等效电路为达林顿结构，但流过 MOSFET 的电流成为 IGBT 总电流的主要部分。此时，通态电压 $U_{ds(on)}$ 可用下式表示：

$$U_{ds(on)} = U_{j1} + U_{dr} + I_d R_{oh} \quad (2-14)$$

式中 U_{j1} ——J1 结的正向电压，其值为 0.7~1V；

U_{dr} ——扩展电阻 R_{dr} 上的压降； R_{oh} ——沟道电阻。

通态电流 I_{ds} 可用下式表示： $I_{ds} = (1 + \beta_{npn}) I_{mos}$ (2-15)

式中 I_{mos} ——流过 MOSFET 的电流。

由于 N+区存在电导调制效应，所以 IGBT 的通态压降小，耐压 1000V 的 IGBT 通态压降为 2~3V。IGBT 处于断态时，只有很小的泄漏电流存在。

2. 动态特性

IGBT 在开通过程中，大部分时间是作为 MOSFET 来运行的，只是在漏源电压 U_{ds} 下降过程后期，PNP 晶体管由放大区至饱和，又增加了一段延迟时间。 $t_d(on)$ 为开通延迟时间， t_{ri} 为电流上升时间。实际应用中常给出的漏极电流开通时间 t_{on} 即为 $t_d(on) + t_{ri}$ 之和。漏源电压的下降时间由 t_{fe1} 和 t_{fe2} 组成，如图 2-58 所示

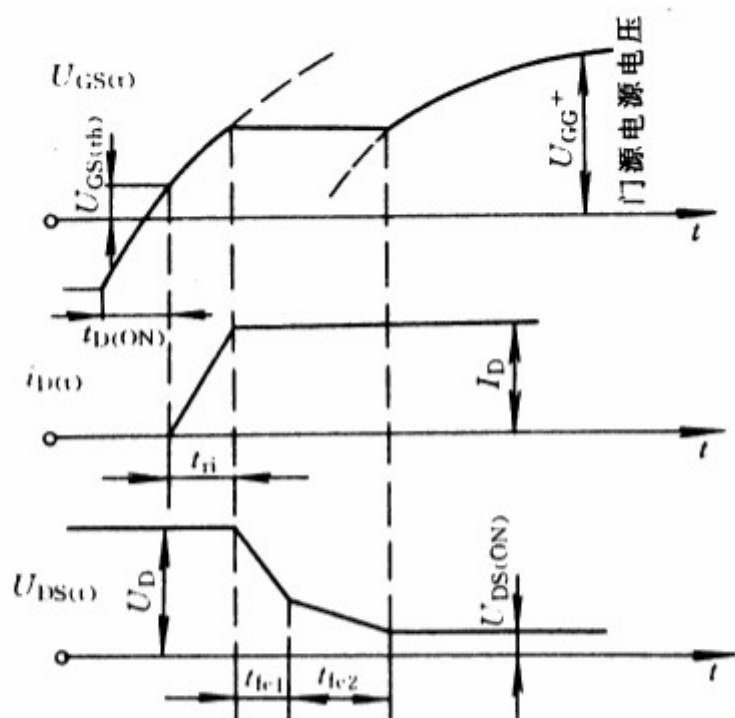


图 2-58 开通时 IGBT 的电流、电压波形

IGBT 在关断过程中，漏极电流的波形变为两段。因为 MOSFET 关断后，PNP 晶体管的存储电荷难以迅速消除，造成漏极电流较长的尾部时间， $t_d(\text{off})$ 为关断延迟时间， t_{rv} 为电压 $U_{ds}(f)$ 的上升时间。

实际应用中常常给出的漏极电流的下降时间 T_f 由图 2-59 中的 $t(f1)$ 和 $t(f2)$ 两段组成，而漏极电流的关断时间 $t(\text{off}) = t_d(\text{off}) + t_{rv} + t(f)$

(2-16)

式中， $t_d(\text{off})$ 与 t_{rv} 之和又称为存储时间。

IGBT 的基本结构

绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 本质上是一个场效应晶体管，只是在漏极和漏区之间多了一个 P 型层。根据国际电工委员会的文件建议，其各部分名称基本沿用场效应晶体管的相应命名。

图 1 所示为一个 N 沟道增强型绝缘栅双极晶体管结构，N+ 区称为源区，附于其上的电极称为源极。N+ 区称为漏区。器件的控制区为栅区，附于其上的电极称为栅极。沟道在紧靠栅区边界形成。在漏、源之间的 P 型区（包括 P+ 和 P- 区）（沟道在该区域形成），称为亚沟道区 (Subchannel region)。而在漏区另一侧的 P+ 区称为漏注入区 (Drain injector)，它是 IGBT 特有的功能区，与漏区和亚沟道区一起形成 PNP

双极晶体管，起发射极的作用，向漏极注入空穴，进行导电调制，以降低器件的通态电压。附于漏注入区上的电极称为漏极。

为了兼顾长期以来人们的习惯，IEC 规定：源极引出的电极端子（含电极端）称为发射极端（子），漏极引出的电极端（子）称为集电极端（子）。这又回到双极晶体管的术语了。但仅此而已。

IGBT 的结构剖面图如图 2 所示。它在结构上类似于 MOSFET，其不同点在于 IGBT 是在 N 沟道功率 MOSFET 的 N+基板（漏极）上增加了一个 P+ 基板（IGBT 的集电极），形成 PN 结 j1，并由此引出漏极、栅极和源极则完全与 MOSFET 相似。

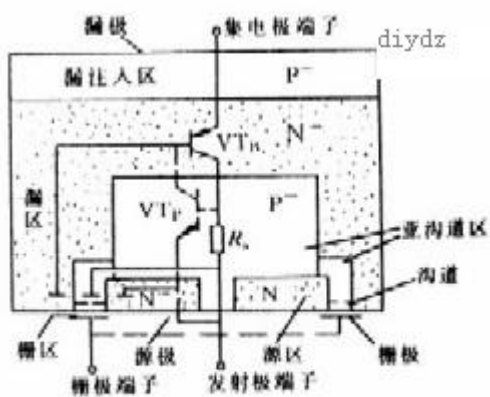


图 2-53 N 沟道增强型绝缘栅双极晶体管结构

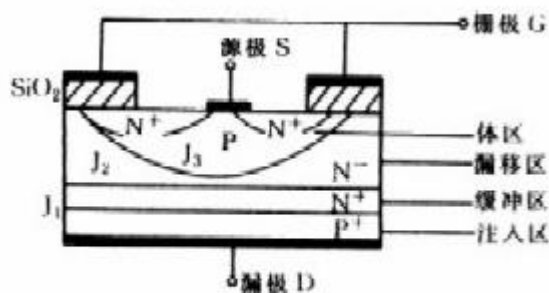


图 2-54 IGBT 的结构剖面图

图 1 N 沟道 IGBT 结构

图

2 IGBT 的结构剖面图

由图 2 可以看出，IGBT 相当于一个由 MOSFET 驱动的厚基区 GTR，其简化等效电路如图 3 所示。图中 R_{dr} 是厚基区 GTR 的扩展电阻。IGBT 是以 GTR 为主导件、MOSFET 为驱动件的复合结构。

N 沟道 IGBT 的图形符号有两种，如图 4 所示。实际应用时，常使用图 2—5 所示的符号。对于 P 沟道，图形符号中的箭头方向恰好相反，如图 4 所示。

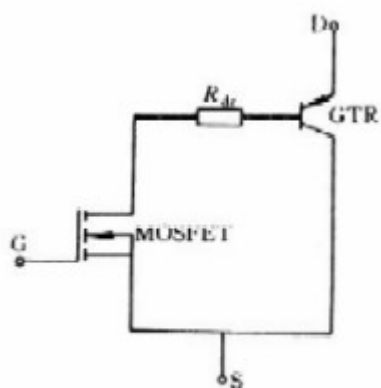


图 2-55 IGBT 的简化等效电路

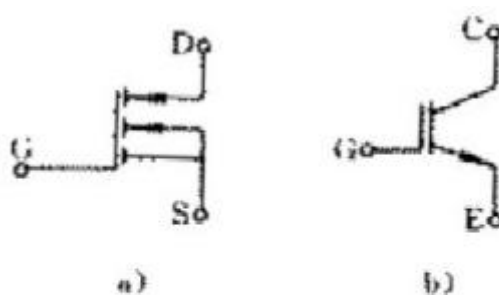


图 2-56 N-IGBT 的图形符号

IGBT 的开通和关断是由栅极电压来控制的。当栅极加正电压时，MOSFET 内形成沟道，并为 PNP 晶体管提供基极电流，从而使 IGBT 导通，此时，从 P+区注到 N 一区进行电导调制，减少 N 一区的电阻 R_{dr} 值，使高耐压的 IGBT 也具有低的通态压降。在栅极上加负电压时，MOSFET 内的沟道消失，PNP 晶体管的基极电流被切断，IGBT 即关断。

正是由于 IGBT 是在 N 沟道 MOSFET 的 N+ 基板上加一层 P+ 基板，形成了四层结构，由 PNP—NPN 晶体管构成 IGBT。但是，NPN 晶体管和发射极由于铝电极短路，设计时尽可能使 NPN 不起作用。所以说，IGBT 的基本工作与 NPN 晶体管无关，可以认为是将 N 沟道 MOSFET 作为输入极，PNP 晶体管作为输出极的单向达林顿管。

采取这样的结构可在 N 一层作电导率调制，提高电流密度。这是因为从 P+ 基板经过 N+ 层向高电阻的 N 一层注入少量载流子的结果。IGBT 的设计是通过 PNP—NPN 晶体管的连接形成晶闸管。

2. IGBT 模块的术语及其特性术语说明

术语	符号	定义及说明（测定条件参改说明书）
集电极、发射极间电压	V_{CES}	栅极、发射极间短路时的集电极，发射极间的最大电压
栅极发极间电压	V_{GES}	集电极、发射极间短路时的栅极，发射极间最大电压

集电极电流	I_c	集电极所允许的最大直流电流
耗散功率	P_c	单个 IGBT 所允许的最大耗散功率
结温	T_j	元件连续工作时芯片温度
关断电流	I_{CES}	栅极、发射极间短路，在集电极、发射极间加上指定的电压时的集电极电流。
漏电流	I_{GES}	集电极、发射极间短路，在栅极、集电极间加上指定的电压时的栅极漏电流
饱和压降	$V_{CE(sat)}$	在指定的集电极电流和栅极电压的情况下，集电极、发射极间的电压。
输入电容	C_{iss}	集电极、发射极间处于交流短路状态，在栅极、发射极间及集电极、发射极间加上指定电压时，栅极、发射极间的电容

3. IGBT 模块使用上的注意事项

1. IGBT 模块的选定

在使用 IGBT 模块的场合，选择何种电压，电流规格的 IGBT 模块，需要做周密的考虑。

a. 电流规格

IGBT 模块的集电极电流增大时， $V_{CE(-)}$ 上升，所产生的额定损耗亦变大。同时，开关损耗增大，原件发热加剧。因此，根据额定损耗，开关损耗所产生的热量，控制器件结温（ T_j ）在 150℃ 以下（通常为安全起见，以 125℃ 以下为宜），请使用这时的集电流以下为宜。特别是用作高频开关时，由于开关损耗增大，发热也加剧，需十分注意。

一般来说，要将集电极电流的最大值控制在直流额定电流以下使用，从经济角度这是值得推荐的。

b. 电压规格

IGBT 模块的电压规格与所使用装置的输入电源即市电电源电压紧密相关。其相互关系列于表 1。根据使用目的，并参考本表，请选择相应的元件。

	元器件电压规格		
	600V	1200V	1400V
电源 电压	200V; 220V; 230V; 240V	346V; 350V; 380V; 400V; 415V; 440V	575V

2. 防止静电

IGBT 的 V_{GE} 的耐压值为 $\pm 20V$ ，在 IGBT 模块上加出了超出耐压值的电压的场合，由于会导致损坏的危险，因而在栅极-发射极之间不能超出耐压值的电压，这点请注意。

在使用装置的场合，如果栅极回路不合适或者栅极回路完全不能工作时（栅极处于开路状态），若在主回路上加上电压，则 IGBT 就会损坏，为防止这类损坏情况发生，应在栅极-发射极之间接一只 $10k\Omega$ 左右的电阻为宜。

此外，由于 IGBT 模块为 MOS 结构，对于静电就要十分注意。因此，请注意下面几点：

- 1) 在使用模块时，手持分装件时，请勿触摸驱动端子部份。
- 2) 在用导电材料连接驱动端子的模块时，在配线未布好之前，请先不要接上模块。
- 3) 尽量在底板良好接地的情况下操作。
- 4) 当必须要触摸模块端子时，要先将人体或衣服上的静电放电后，再触摸。
- 5) 在焊接作业时，焊机与焊槽之间的漏泄容易引起静电电压的产生，为了防止静电的产生，请先将焊机处于良好的接地状态下。
- 6) 装部件的容器，请选用不带静电的容器。

3. 并联问题

用于大容量逆变器等控制大电流场合使用 IGBT 模块时，可以使用多个器件并联。

并联时，要使每个器件流过均等的电流是非常重要的，如果一旦电流平衡达到破坏，那么电过于集中的那个器件将可能被损坏。

为使并联时电流能平衡，适当改变器件的特性及接线方法。例如。挑选器件的 $V_{CE(sat)}$ 相同的并联是很重要的。

4. 其他注意事项

- 1) 保存半导体原件的场所的温度，湿度，应保持在常温常湿状态，不应偏离太大。常温的规定为 $5-35^{\circ}\text{C}$ ，常湿的规定为 $45-75\%$ 左右。
- 2) 开、关时的浪涌电压等的测定，请在端子处测定。

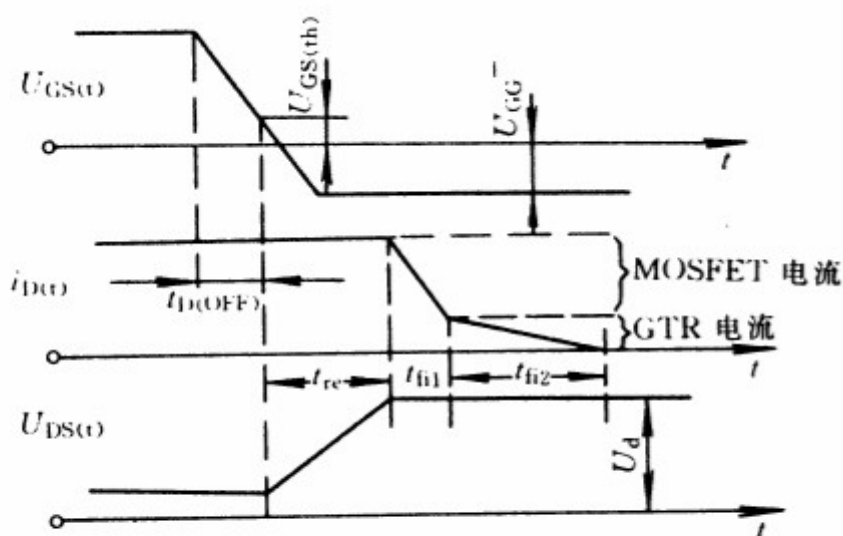


图 2-59 关断时 IGBT 的电流、电压波形

实验目的

1. 熟悉 IGBT 主要参数与开关特性的测试方法。
2. 掌握混合集成驱动电路 EXB840 的工作原理与调试方法。

二、实验内容

1. IGBT 主要参数测试。
2. EXB840 性能测试。
3. IGBT 开关特性测试。
4. 过流保护性能测试。

三、实验设备和仪器

- 1. MCL 系列教学实验台主控制屏
- 2. MCL—07 电力电子实验箱中的 IGBT 与 PWM 波形发生器部分。
- 3. 万用表二块
- 4. 双踪示波器。

四、实验线路

见图 5—1。

五、实验方法

1. IGBT 主要参数测试

(1) 开启阈值电压 $V_{GS(th)}$ 测试

在主回路的“1”端与 IGBT 的“18”端之间串入毫安表，将主回路的“3”与“4”端分别与 IGBT 管的“14”与“17”端相连，再在“14”与“17”端间接入电压表，并将主回路电位器 RP 左旋到底。将电位器 RP 逐渐向右旋转，边旋转边监视毫安表，当漏极电流 $I_D=1mA$ 时的栅源电压值即为开启阈值电压 $V_{GS(th)}$ 。

读取 6—7 组 I_D 、 V_{GS} ，其中 $I_D=1mA$ 必测，填入表 5—1。

表 5—1

I_D (mA)				1			
V_{GS} (V)							

(2) 跨导 g_{FS} 测试

在主回路的“2”端与 IGBT 的“18”端串入安培表，将 RP 左旋到底，其余接线同上。

将 RP 逐渐向右旋转，读取 I_D 与对应的 V_{GS} 值，测量 5—6 组数据，填入表 5—2。

表 5—2

I_D (mA)				1			
V_{GS} (V)							

(3) 导通电阻 R_{DS} 测试

将电压表接入“18”与“17”两端，其余同上，从小到大改变 V_{GS} ，读取 I_D 与对应的漏源电压 V_{DS} ，测量 5—6 组数据，填入表 5—3。

表 5—3

I_D (mA)				1			
V_{GS} (V)							

2. EXB840 性能测试

(1) 输入输出延时时间测试

IGBT 部分的“1”与“13”分别与 PWM 波形发生部分的“1”与“2”相连，再将 IGBT 部分的“10”与“13”、与门输入“2”与“1”相连，用示波器观察输入“1”与“13”及 EXB840 输出“12”与“13”之间波形，记录开通与关断延时时间。

t_{on} = _____， t_{off} = _____。

(2) 保护输出部分光耦延时时间测试

将 IGBT 部分“10”与“13”的连线断开，并将“6”与“7”相连。用示波器观察“8”与“13”及“4”与“13”之间波形，记录延时时间。

(3) 过流慢速关断时间测试

接线同上，用示波器观察“1”与“13”及“12”与“13”之间波形，记录慢速关断时间。

(4) 关断时的负栅压测试

断开“10”与“13”的相连，其余接线同上，用示波器观察“12”与“17”之间波形，记录关断时的负栅压值。

(5) 过流阈值电压测试

断开“10”与“13”，“2”与“1”的相连，分别连接“2”与“3”，“4”与“5”，“6”与“7”，将主回路的“3”与“4”分别和“10”与“17”相连，即按照以下表格的说明连线。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/708020142110006107>