

## IGBT 的结构和工作原理

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 一区）（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。

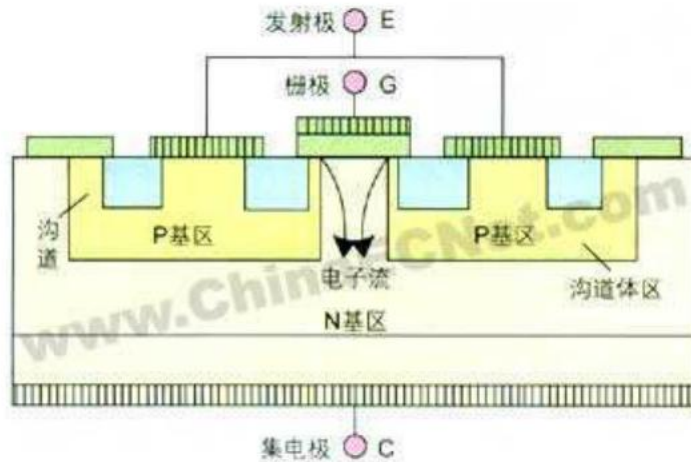


图 1 N 沟道 IGBT 示意图

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（少数），对 N 一层进行导电调制，减小 N 一层的电阻，使 IGBT 在高电压时，也具有低的通态电压。

## 2. IGBT 的工作特性

### 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  $\beta$  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：

$$U_{ds(on)} = U_{j1} + U_{dr} + I_d R_{oh}$$

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:

$$I_{ds} = (1 + \beta_{npn}) I_{mos}$$

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。

IGBT 的触发和关断要求给其栅极和基极之间加上正向电压和负向电压, 栅极电压可由不同的驱动电路产生。当选择这些驱动电路时, 必须基于以下的参数来进行: 器件关断偏置的要求、栅极电荷的要求、耐固性要求和电源的情况。因为 IGBT 栅极-发射极阻抗大, 故可使用 MOSFET 驱动技术进行触发, 不过由于 IGBT 的输入电容较 MOSFET 为大, 故 IGBT 的关断偏压应该比许多 MOSFET 驱动电路提供的偏压更高。

IGBT 的开关速度低于 MOSFET, 但明显高于 GTR。IGBT 在关断时不需要负栅压来减少关断时间, 但关断时间随栅极和发射极并联电阻的增加而增加。IGBT 的开启电压约 3~4V, 和 MOSFET 相当。IGBT 导通时的饱和压降比 MOSFET 低而和 GTR 接近, 饱和压降随栅极电压的增加而降低。

正式商用的高压大电流 IGBT 器件至今尚未出现, 其电压和电流容量还很有限, 远远不能满足电力电子技术发展的需求, 特别是在高压领域的许多应用中, 要求器件的电压等级达到 10KV 以上。目前只能通过 IGBT 高压串联等技术来实现高压应用。国外的一些厂家如瑞士 ABB 公司采用软穿通原则研制出了 8KV 的 IGBT 器件, 德国的 EUPEC 生产的 6500V/600A 高压大功率 IGBT 器件已经获得实际应用, 日本东芝也已涉足该领域。与此同时, 各大半导体生产厂商不断开发 IGBT 的高耐压、大电流、高速、低饱和压降、高可靠性、低成本技术, 主要采用 1  $\mu$ m 以下制作工艺, 研制开发取得一些新进展。

## 3. IGBT 的工作原理

N 沟型的 IGBT 工作是通过栅极-发射极间加阈值电压  $V_{TH}$  以上的 (正) 电压, 在栅极电极正下方的 p 层上形成反型层 (沟道), 开始从发射极电极下的 n-层注入电子。该电子为 p+n-p 晶体管的少数载流子, 从集电极衬底 p+层开始流入空穴, 进行电导率调制 (双极工作), 所以可以降低集电极-发射极间饱和电压。工作时的等效电路如图 1 (b) 所示, IGBT 的符号如图 1 (c) 所示。在发射极电极侧形成 n+pn-寄生晶体管。若 n+pn-寄生晶体管工作, 又变成 p+n- pn+晶闸管。电流继续流动, 直到输出侧停止供给电流。通过输出信号已不能进行控制。一般将这种状态称为闭锁状态。

为了抑制 n+pn-寄生晶体管的工作 IGBT 采用尽量缩小 p+n-p 晶体管的电流放大系数  $\alpha$  作为解决闭锁的措施。具体地说, p+n-p 的电流放大系数  $\alpha$  设计为 0.5 以下。IGBT 的闭锁电流  $I_L$  为额定电流 (直流) 的 3 倍以上。IGBT 的驱动原理与电力 MOSFET 基本相同, 通断由栅射极电压  $u_{GE}$  决定。

### (1) 导通

IGBT 硅片的结构与功率 MOSFET 的结构十分相似, 主要差异是 IGBT 增加了 P+ 基片和一个 N+ 缓冲层 (NPT-非穿通-IGBT 技术没有增加这个部分), 其中一个 MOSFET 驱动两个双极器件。基片的应用在管体的 P+和 N+ 区之间创建了一个 J1 结。当正栅偏压使栅极下面反演 P 基区时, 一个 N 沟道形成, 同时出现一个电子流, 并完全按照功率 MOSFET 的方式产生一股电流。如果这个电子流产生的电压在 0.7V 范围内, 那么, J1 将处于正向偏压, 一些

空穴注入 N-区内，并调整阴阳极之间的电阻率，这种方式降低了功率导通的总损耗，并启动了第二个电荷流。最后的结果是，在半导体层次内临时出现两种不同的电流拓扑：一个电子流(MOSFET 电流)；空穴电流（双极）。 $u_{GE}$  大于开启电压  $U_{GE(th)}$  时，MOSFET 内形成沟道，为晶体管提供基极电流，IGBT 导通。

(2)导通压降：电导调制效应使电阻  $R_N$  减小，使通态压降小。

### (3)关断

当在栅极施加一个负偏压或栅压低于门限值时，沟道被禁止，没有空穴注入 N-区内。在任何情况下，如果 MOSFET 电流在开关阶段迅速下降，集电极电流则逐渐降低，这是因为换向开始后，在 N 层内还存在少数的载流子（少子）。这种残余电流值（尾流）的降低，完全取决于关断时电荷的密度，而密度又与几种因素有关，如掺杂质的数量和拓扑，层次厚度和温度。少子的衰减使集电极电流具有特征尾流波形，集电极电流引起以下问题：功耗升高；交叉导通问题，特别是在使用续流二极管的设备上，问题更加明显。

鉴于尾流与少子的重组有关，尾流的电流值应与芯片的温度、 $I_C$  和  $V_{CE}$  密切相关的空穴移动性有密切的关系。因此，根据所达到的温度，降低这种作用在终端设备设计上的电流的不理想效应是可行的，尾流特性与  $V_{CE}$ 、 $I_C$  和  $T_C$  有关。

栅射极间施加反压或不加信号时，MOSFET 内的沟道消失，晶体管的基极电流被切断，IGBT 关断。

### (4)反向阻断。

当集电极被施加一个反向电压时， $J_1$  就会受到反向偏压控制，耗尽层则会向 N-区扩展。因过多地降低这个层面的厚度，将无法取得一个有效的阻断能力，所以，这个机制十分重要。另一方面，如果过大地增加这个区域尺寸，就会连续地提高压降。

### (5)正向阻断。

当栅极和发射极短接并在集电极端子施加一个正电压时， $P/NJ_3$  结受反向电压控制。此时，仍然是由 N 漂移区中的耗尽层承受外部施加的电压。

### (6)闩锁。

IGBT 在集电极与发射极之间有一个寄生 PNP 晶闸管。在特殊条件下，这种寄生器件会导通。这种现象会使集电极与发射极之间的电流量增加，对等效 MOSFET 的控制能力降低，通常还会引起器件击穿问题。晶闸管导通现象被称为 IGBT 闩锁，具体地说，这种缺陷的原因互不相同，与器件的状态有密切关系。通常情况下，静态和动态闩锁有如下主要区别：当晶闸管全部导通时，静态闩锁出现。

只在关断时才会出现动态闩锁。这一特殊现象严重地限制了安全操作区。

为防止寄生 NPN 和 PNP 晶体管的有害现象，有必要采取以下措施：一是防止 NPN 部分接通，分别改变布局和掺杂级别。二是降低 NPN 和 PNP 晶体管的总电流增益。

此外，闩锁电流对 PNP 和 NPN 器件的电流增益有一定的影响，因此，它与结温的关系也非常密切；在结温和增益提高的情况下，P 基区的电阻率会升高，破坏了整体特性。因此，器件制造商必须注意将集电极最大电流值与闩锁电流之间保持一定的比例，通常比例为 1: 5。