

1.5.4 沟槽栅(Trench)IGBT

到目前为止,所有的 IGBT 设计都有一个共同点:平面栅极结构。这种形状的栅极形成一个前文所述的 JFET 结构,以及发射极区软弱的电导调制效应。对于平面栅极的 IGBT,载流子的浓度从集电极到发射极之间逐步降低。新一代 IGBT 的设计目标是保持载流子浓度均匀分布,最好是逐步增加,这样可以进一步降低通态损耗,而不会影响拖尾电流和关断损耗,从而导致沟槽型栅极结构的出现。

图 1.42a 给出了基于 PT IGBT 原理的沟槽栅 IGBT 内部结构和电场分布图,而图 1.42b 是通过电子扫描显微镜拍摄的沟槽栅极结构的放大图。这种结构与普通的平面栅极结构的主要区别在于,当 IGBT 开通时,P 型发射区的反型沟道是垂直的而不是横向的,这就意味着不存在 JFET 效应。由于大量电子的注入,发射区附近的电导调制效率很高。

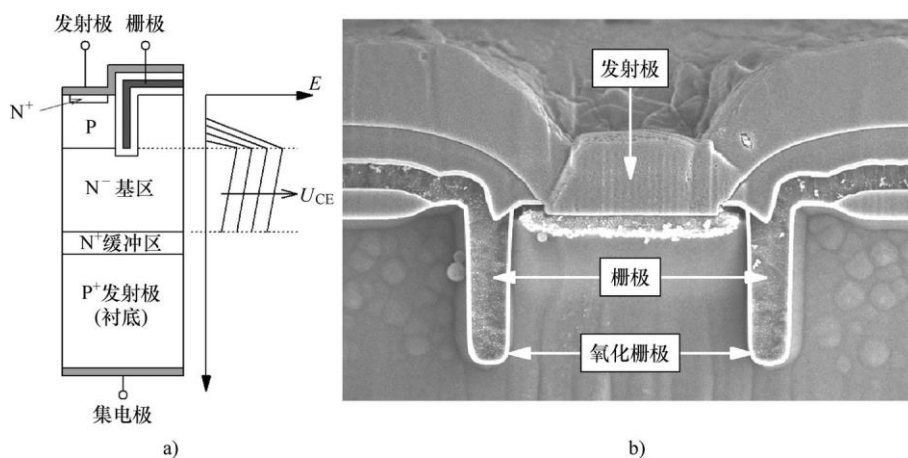


图 1.42 沟槽栅 IGBT 内部结构和电场分布(不成比例)及栅极结构

所有这些都对载流子的浓度产生积极影响。作为比较,图 1.43 给出了沟槽栅和平面栅结构 IGBT 内部载流子浓度比较。非常明显,从集电极到发射极,沟槽栅 IGBT 的载流子浓度是逐步升高的,而平面 IGBT 则相反。发射区载流子浓度的设计与很多因素相关,其中包括 IGBT 元胞的尺寸和他们之间的距离,这样就使得载流子浓度的调整有无限多的可能。然而应该牢记的是,更高的载流子浓度有利于降低通态损耗;另一方面,载流子越少,越有利于降低关断损耗。事实证明,内部均匀的或者略微递增的载流子浓度有利于平衡沟槽栅 IGBT 的静态和动态损耗。

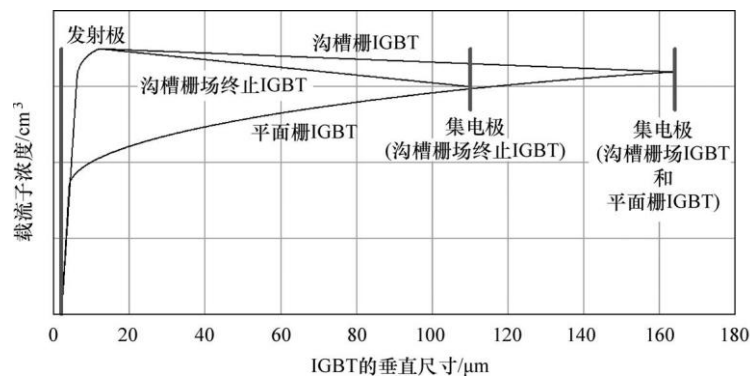


图 1.43 沟槽栅和平面栅结构 IGBT 内部载流子浓度比较

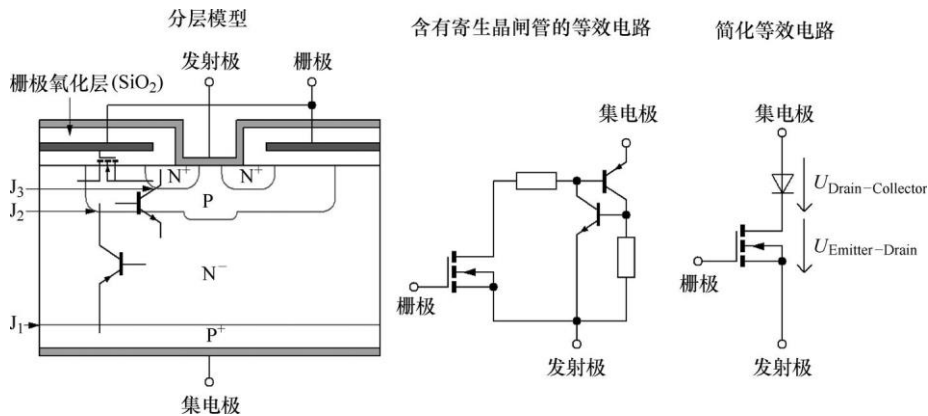


图 1.29 IGBT 内部结构和等效电路(不成比例)

根据图 1.29 所示的简化电路图,IGBT 内部的电压降可表示为

$$U_{CESat} = U_{Emitter-Drain} + U_{Drain-Collector} \quad (1.65)$$

$U_{Emitter-Drain}$ 表示 IGBT 的发射极和等效 MOSFET 漏极的电压, $U_{Drain-Collector}$ 表示漏极到集电极之间的电压。可以通过增加每个 IGBT 导电沟道的宽度来降低 $U_{Emitter-Drain}$ 。相比于平面栅 IGBT, 沟槽栅 IGBT 垂直结构的导电沟道更有利于设计紧凑的元胞。即在同等芯片面积上可以制作更多的 IGBT 元胞, 从而增加导电沟道的宽度。另外, $U_{Emitter-Drain}$ 可以通过消除 JFET 效应的方法进一步降低。采取这些方法, 可以消除 U_{CESat} 中 $U_{Emitter-Drain}$ 分量。也就是说, 对于现代的 IGBT, 饱和压降主要由 $U_{Drain-Collector}$ 决定。

增加导电沟道的宽度有利于电导率上升, 但是也有它的缺点: 较宽的导电沟道会增加 IGBT 短路时的电流。最不利的情况就是, 短路电流可能会很大, 以至于非常短时间内就损坏 IGBT。为了使得 IGBT 具有 $10\mu s$ 的短路能力(给定的测试条件下), 需要非常小心地设计沟道宽度及相邻的元胞。为此需要平衡元胞的尺寸和间距, 或者不要把所有的栅极接到公共栅极, 而是把一些单元的栅极和发射极直接短路。后者称为插入合并单元工艺(Plugged Cell Merged, PCM)。平面栅 IGBT 和沟槽栅 IGBT 结构如图 1.44 所示。

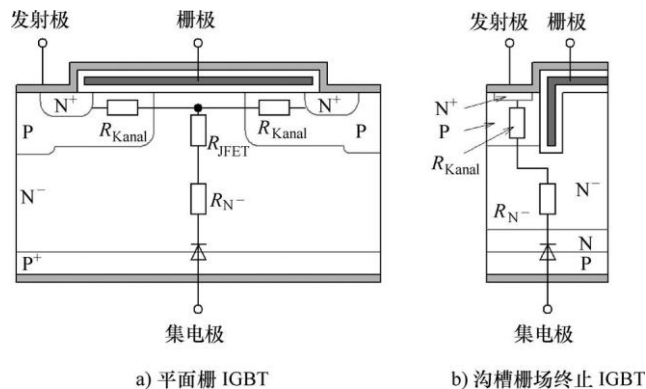


图 1.44 平面栅 IGBT 和沟槽栅 IGBT 结构