

3.5.3 栅极电荷和密勒效应^②

IGBT 的栅极对外显示出类似电容的特性,即电压由充电电荷和电容决定,即

$$Q=C \cdot U \quad (3.30)$$

电容的数值一般是恒定不变的,所以在一定电压下,电压与电荷呈线性关系,但是 IGBT 的等效电容则不一样,图 3.29 给出了栅极电荷 Q_G 标么值和栅极电压 U_{GE} 的关系,最终充电电荷到达 E 点。栅极电荷充电过程可以分为四个区域。

在时间 A 处,栅极电荷处于积累模式。在时间段 AB 之间电容 C_{GE} 被充电, U_{GE} 根据式(3.31)上升。在实际的应用之中,时间 t_{A-B} 由驱动电阻(包括内部和外部电阻)和等效栅极电容决定,所以, C_{GE} 不是线性上升,而是按指数规律上升^②。

$$U_{GE, A-B} = \frac{I_G \cdot t_{A-B}}{C_{GE}} = \frac{Q_{G, B}}{C_{GE}} \quad (3.31)$$

在时间 B 处, U_{GE} 到达了平带电压 U_{FB} ^③,受电压影响的 MOS 电容(属于 C_{GE} 的一部分)不再影响充电过程。这时相比于时间段 AB, C_{GE} 的值降低。相应地,栅极充电斜率上升。在时间段 BC 之间,栅极电压 $U_{GE, B-C}$ 超过栅极阈值电压 $U_{GE(TO)}$,所以 IGBT 开始工作。

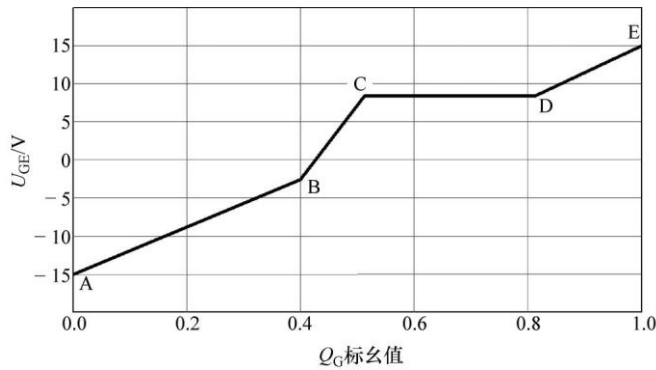


图 3.29 栅极电荷 Q_G 标么值和栅极电压 U_{GE} 的关系

在时间段 CD,栅极的充电过程是由反馈电容 C_{GC} (也叫作密勒电容)决定的。这时,集-射极电压 U_{CE} 不断降低,电流 I_{GC} 通过 C_{GC} 给栅极放电^④,这部分电流需要驱动电流 I_{Driver} 来补偿。这时栅极出现一个恒定的电压,这种现象叫作密勒电压或密勒平台。

$$I_G = I_{Driver} + I_{GC} = I_{Driver} + C_{GC} \cdot \frac{dU_{CE}}{dt} \quad (3.32)$$

IGBT 一旦进入饱和,此时的电压为饱和电压 U_{CEsat} , dU_{CE}/dt 会下降到零,也没有任何反馈。在到达时间点 E 之前,驱动电流会对栅极一直充电,其效果和 AB 段相似。

不同厂家的数据手册和应用文档都给出了类似于图 3.29 的栅极电荷充电曲线,也给出了在时间点 E 时的电荷 $Q_G = f(U_{GE})$ 。

如果给出了 IGBT 栅-射极之间的推荐电容 C_{GE} ,就可以根据该电容找到栅极充电曲线或者充电电荷 Q_G 。因为栅极电荷与温度无关,所以这些测量都是在环境温度为 25°C 时完成的。但是栅极电荷与 IGBT 的技术和标称电流有关,和 IGBT 的阻断电压 U_{CES} 无关。

由于栅极几何结构上的不同,沟槽栅 IGBT 比平面 IGBT 具有更高的栅极电荷。所以对于沟槽栅 IGBT,栅极电容 C_{GE} 和充电电荷 Q_G 的值相对大一点,所以,沟槽栅 IGBT 需要提供更大的驱动功率。

⊖ 由于集电极-发射极之间的电压变换率为负,所以 C_{GC} 上的电流也负值,比如,集电极-发射极电压由近似直流母线电压 U_{bc} 降为饱和电压 U_{CEsat} 。

⊖ 密勒效应以美国物理学家 John Milton Miller(1882~1962)命名,他在 1919 年第一次阐述了密勒效应。

⊖ 在绝大多数应用中,驱动电源是一个电压源,因此在开通过程中,由于驱动电压下降,栅极电流 I_G 的增大依赖于时间。用一个电流源代替电压源驱动 IGBT,可以实现 U_{GE} 的线性增大,因此 Q/U 的梯度总是线性的。

⊖ 平带电压 U_{FB} 描述了在某一时间,栅极表面和下层半导体金属氧化层(两者之间有栅极氧化层隔离)之间的电位相同。这时,由于栅极电荷和半导体电荷互相抵消,半导体金属氧化层的能带是平坦的。