

## 3.6 短路特性

正如前文提到的,可以在图 3.1 所示的半桥电路中测试 IGBT 的短路特性 SC1 和 SC2,如图 3.31 所示。SC1 型短路是指在 IGBT 开通前,已经发生短路,测试中电感  $L$  需要更换为一个低电感的导线实现桥臂短路。SC2 短路指 IGBT 开通后发生短路。

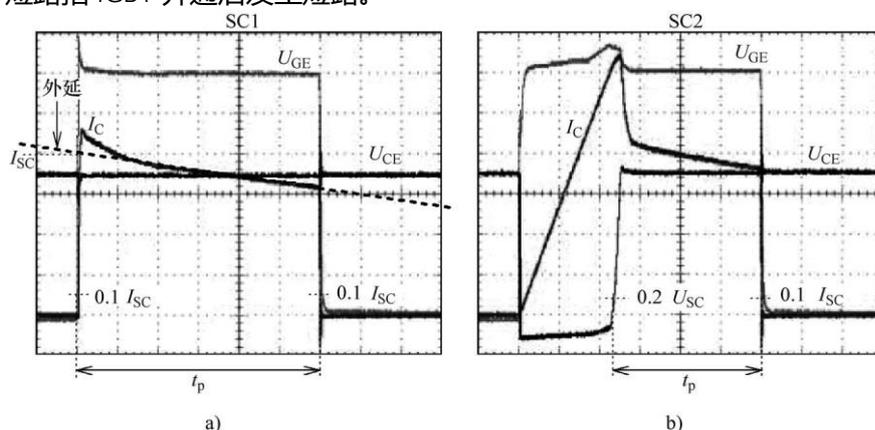


图 3.31 SC1 和 SC2 短路

虽然数据手册或者应用文档中没有明确提及,厂家通常只标定 SC1 短路,对于 SC2 短路却没有相关说明。在第 6 章 6.7.3 节和第 7 章 7.6 节将会讨论在实际应用中可能产生的 SC2 短路问题。这里将详细地分析 IGBT 两种基本的短路行为。

虽然演示 SC2 短路有一定的危险性,但可通过以下步骤模拟:如图 3.1 所示的半桥测试电路中,用一只几十 nH 的小感量电感  $L$ 。当 IGBT 开通时,集电极电流以正斜率  $di_c/dt$  上升,电感承受全部电压。当短路电流大到一定程度时,IGBT 开始退饱和。这时电流不再上升,比如  $di_c/dt$  趋向于零。因此电感不再承受电压,IGBT 也从饱和模式进入短路工作模式。电感的取值要保证 IGBT 在  $5\mu\text{s}$  后进入退饱和模式。图 3.31 给出了两种短路特性的实验结果。对于 SC1 型短路,短路时间  $t_p$  指电流从上升  $I_{SC}10\%$  的时刻开始到短路电流下降到  $10\%$  时的时间。然而对于 SC2 型短路,这个时间是从电压上升到  $20\%$  的  $U_{DC}$  时开始,到电流下降到  $10\%$  的  $I_{SC}$  为止。

IGBT 的短路特性由以下几点决定:

- 驱动电压  $U_{GE}$ :数据手册给出的短路电流或短路 SOA 图表,通常指定驱动  $U_{GE}=15\text{V}$ 。不同  $U_{GE}$  时的短路电流  $I_{SC}$  如图 3.32 所示。由于 IGBT 存在跨导<sup>⊖</sup>,即集电极电流依赖于驱动电压,驱动电压增大或减小会影响短路电流的增大或减小。因此对于 SC1 短路,短路电流不是集电极电流  $I_c$  的峰值电流,而是在驱动电压为  $15\text{V}$  时,短路电流的线性外延值,如图 3.31a 和图 3.32 所示。

⊖ 跨导  $g_m$  表示了输出电流和输入电压之间的关系。跨导这个词来源于“转移电导率”。这里电导率指电子元件的有效电导系数。

⊖ 这些值只是作为参考电压,而且不同厂商各不相同。

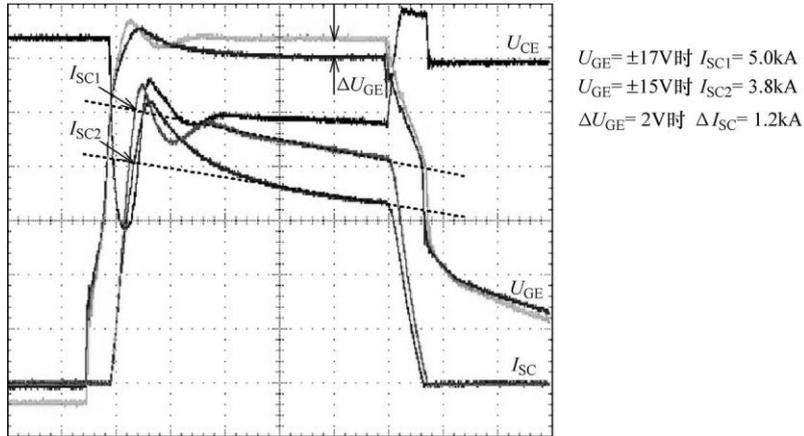


图 3.32 不同  $U_{GE}$  时的短路电流  $I_{SC}$

• 直流母线电压  $U_{DC}$  及集-射极电压  $U_{CE}$ : 数据手册中标识的短路电流  $I_{SC}$  通常是在指定的直流母线电压  $U_{DC}$  或集-射极  $U_{CE}$  下的值, 或者以短路 SOA 图代替。由于不同的厂商采用不同的最大电压  $U_{CE}$ , 下文的  $U_{CE}$  参考了 IGBT 的标称电压<sup>①</sup>, 比如:

- 600V IGBT  $\Rightarrow U_{CE} \leq 360 \sim 400V$
- 1.2kV IGBT  $\Rightarrow U_{CE} \leq 800 \sim 900V$
- 1.7kV IGBT  $\Rightarrow U_{CE} \leq 1.0 \sim 1.1kV$
- 3.3kV IGBT  $\Rightarrow U_{CE} \leq 2.5kV$
- 6.5kV IGBT  $\Rightarrow U_{CE} \leq 4.4kV$

• 短路时间  $t_{SC}$ : 短路时间表明了多长时间的短路会对 IGBT 产生影响(图 3.31 中的  $t_p$ )。一般情况下, 短路时间是由短路能量决定的, 短路能量可通过在短路时间内对短路电流和电压的乘积积分计算得到。但是, 需要特别注意的是, 短路电流越大, 所允许的短路时间就越短。如果短路时间过长, 就会损坏元件。因此如果发生短路, 需要在短路时间内关断 IGBT, 这就对驱动电路提出更高的要求。常用短路时间  $t_{SC}$  的取值范围在  $6 \sim 10\mu s$ , 而短路电流在  $4 \sim 8$  倍的额定电流。需要注意的是, 短路时间  $t_{SC}$  只适用于数据手册中指定的条件。比如, 如果 IGBT 在很低的直流母线电压下运行, 那么  $t_{SC}$  也可以选取更大的值。但是, 厂商很少给出这种关系。短路时间不是唯一的判定标准, 进一步分析可以看出, 可以用短路时芯片内部传递的能量  $E_{SC}$  来替代短路时间。但是集-射极电压会影响短路能量, 而前者又受到比如换流回路的杂散电感、短路电流等的影响。同样, 短路电流依赖于驱动电压, 而驱动电压又与电压梯度  $dU_{CE}/dt$  及结温相关。这些参数之间的相关性来之于实际的应用对象, 很难确定其间的定量关系。所以为了简化, 厂商给出了最大短路时间作为一个参考值。

• 结温  $T_{vj}$ : 在短路之前, 结温通常低于数据手册中给出的最大结温  $T_{vj,op}$ 。当 IGBT 短路时, 产生的热量使得芯片温度上升, 当结温超过芯片的极限温度 ( $\geq 200^\circ C$ ) 时就可能损坏。IGBT 温度升高也是图 3.31 和图 3.32 测量的集电极电流下降的原因。数据手册中给出了  $T_{vj,op}$  下短路时间  $t_{SC}$ 。对于较低的结温, 短路时间也许变大, 但是厂商没有明确地给出这两者之间的关系。结温也可以决定短路电流的绝对值。短路之前的结温越高, 短路电流就越小。图 3.33 给出了短路电流  $I_{SC}$  和结温  $T_{vj}$  之间的关系。

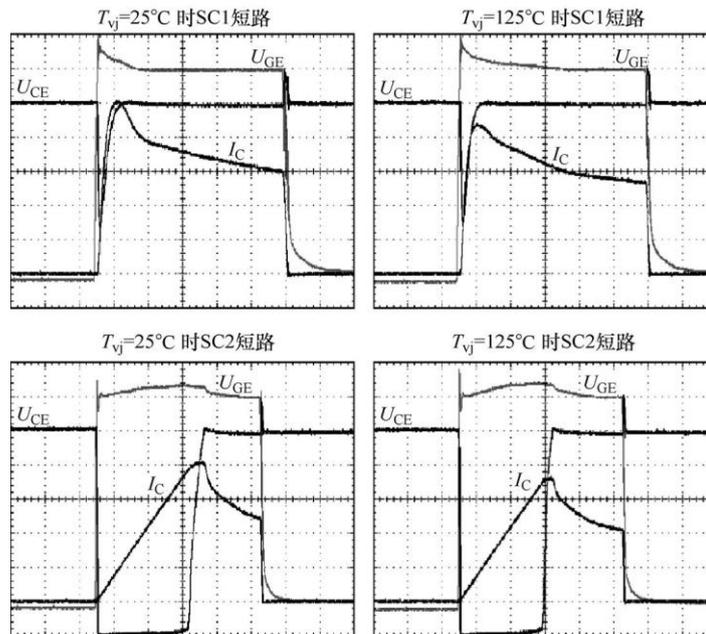


图 3.33 短路电流  $I_{sc}$  和结温  $T_{vj}$  之间的关系(测试条件一致,且没有采用栅极或集电极钳位)

• IGBT 技术:IGBT 技术决定器件的特性,其中就包括 MOS 沟道的宽度(1.5.4 小节)。根据设计不同,不同的参数相互作用导致不同的开关特性:

- 关断损耗/关断能量  $E_{off}$ :MOS 沟道越宽,关断损耗就越大;
- 饱和压降  $U_{CEsat}$ :MOS 沟道越宽,饱和压降就越低。

以上两种特性的依赖关系可以从 IGBT 折中特性曲线上看出来。

- 短路时间  $t_{sc}$ :MOS 沟道越宽,短路时间越短。这是因为更宽的 MOS 导电通道意味着较低的阻抗,也就是可以流过更高的短路电流,所以 IGBT 的温度就上升得越快。因此对于宽 MOS 沟道的 IGBT,要限制短路时间  $t_{sc}$  以防止损坏器件。