

注意: Q_{rr} 对温度的依赖性极大 (从 25°C 到 150°C 时约增加一倍)。

参数: 通态电流 I_F 、反向电压 V_R 、换流速率 $-di_F/dt$ 、芯片温度 $T_j = 25^\circ\text{C}$ 或 150°C

二极管的芯片热阻 R_{thjc}

芯片热阻 R_{thjc} 描述了二极管芯片 (下标 j) 和模块底板 (下标 c) 之间的传热界面。

2.3.3 特性曲线图

在这一节里,我们将按照参数表的顺序,介绍在 IGBT 模块参数表中所包含的特性曲线的一些要点。如果其中某些图在其他章节中还会被更详细地涉及,则在此节中将只给出索引。

IGBT 模块耗散功率的最大定额 P_{tot} 与壳温 T_{case} 的关系

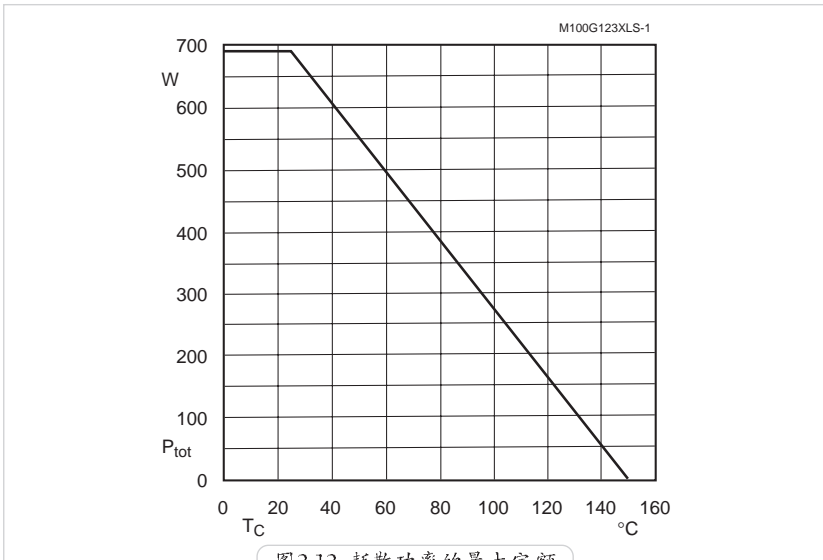


图2.12 耗散功率的最大定额

以 $T_{case} = 25^\circ\text{C}$ 时所给定的临界值为起点,该曲线描述了 IGBT (或续流二极管) 的耗散功率的最大定额随壳温增加而下降的关系:

$$P_{tot(25^\circ\text{C})} = (T_{jmax} - 25^\circ\text{C}) / R_{thjc}$$

IGBT 单脉冲的开通能耗 E_{on} 、关断能耗 E_{off} 与集电极电流 I_c 的关系

图 2.13 显示了开通和关断能耗与不同的集电极电流的关系。这些值是在给定驱动参数的情况下,通过一个带有阻感性负载的测量电路测得的。测量时,IGBT 处于高负荷状态 (例如,芯片温度 $T_j = 125^\circ\text{C}$ 、工作电压 $V_{cc} = 600\text{ V}$)。

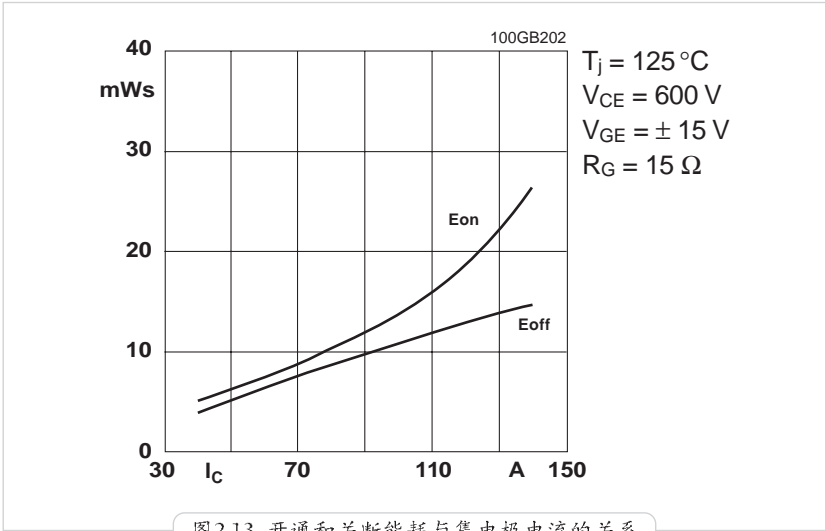


图2.13 开通和关断能耗与集电极电流的关系

此参数与开关频率相乘便可以得到相应的开关损耗:

$$P_{on} = f * E_{on}$$

$$P_{off} = f * E_{off}$$

在 IGBT 的特性参数值中给出了额定电流 ($I_C@T_{case} = 80^\circ\text{C}$) 下的开通和关断能耗。

IGBT 单脉冲的开通能耗 E_{on} 、关断能耗 E_{off} 与栅极电阻 R_G (R_{Gon} , R_{Goff}) 的关系
 见 3.5.2 节

开关工作状态下的最大安全工作区域 (SOA)

如 1.2.3 节中所提到的, 在硬开关工作状态下, IGBT 需要提供一个准正方形的安全工作区域 $i = f(u)$ 。

SOA (安全工作区域) 的曲线描述了各种临界的、不导致模块损坏的运行状态:

1. SOA 限定了开关运行、通态运行、单脉冲运行的状态;
2. RBSOA (反向偏置 SOA) 限定了周期性关断的运行状态;
3. SCSOA (短路 SOA) 限定了非重复性的短路关断 (见 3.6.2 节)。

SOA 的边界曲线为:

1. 最大允许的集电极电流 (水平边界);
2. 最大允许的集电极-发射极电压 (垂直边界);
3. 最大允许功耗或最高允许的芯片温度 (对角线), 见图 2.14。

脉冲工作状态下的最大安全工作区域 (SOA)

针对不同的脉冲宽度 t_p , 图 2.14 以双对数图的形式显示了 IGBT 在开关和通态工作状态下的安全工作图 $I_C = f(V_{CE})$ 。

必须指出的是, 图中的临界值只适用于单脉冲和壳温 $T_C = 25^\circ\text{C}$ 时。在这一单脉冲的作用下, IGBT 的芯片温度不得超过最高允许值 $T_j = 150^\circ\text{C}$ 。

安全工作区域图中的最下面一条对角线代表了最大允许的静态功耗。尽管如此, IGBT 模块也只能在开关期间被允许经过线性放大区 ($V_{CE} > 20\text{V}$ 或 $V_{GE} < 9\text{V}$)。因为由芯片之间的制造偏差而引起的不对称和开启电压的负温度系数可能会引起系统发热的失衡, 所以不允许长时间运行在放大区域。

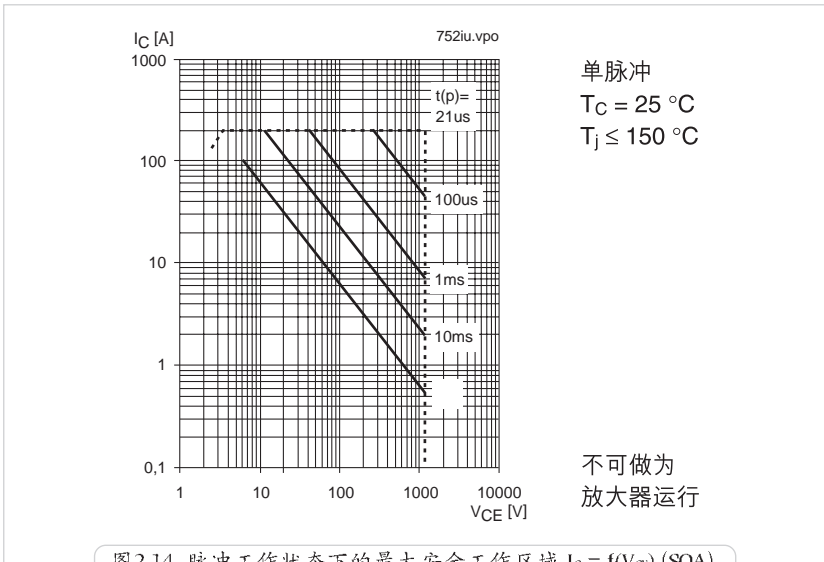
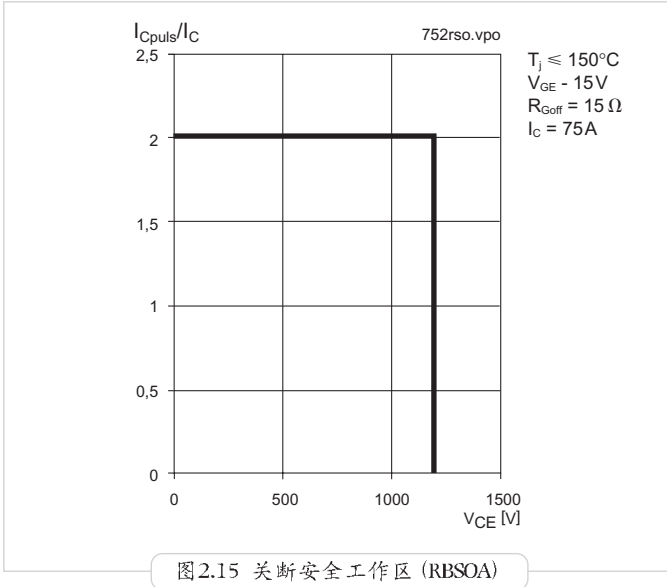


图2.14 脉冲工作状态下的最大安全工作区域 $I_C = f(V_{CE})$ (SOA)

周期性关断运行时的最大安全工作区域

图 2.15 显示了 IGBT 在周期性关断运行时的最大允许工作区域。



在周期性关断运行时，IGBT 应该能够在最高结温 T_{jmax} 以及给定的驱动条件下硬性关断 $I_{CM}@T_C = 80^\circ\text{C}$ 。此时，芯片的 V_{CE} 不得超过 V_{CES} （寄生电感以及驱动条件的影响见 3.4.1 节和 3.5.2 节）。

短路状态下的最大安全工作区域

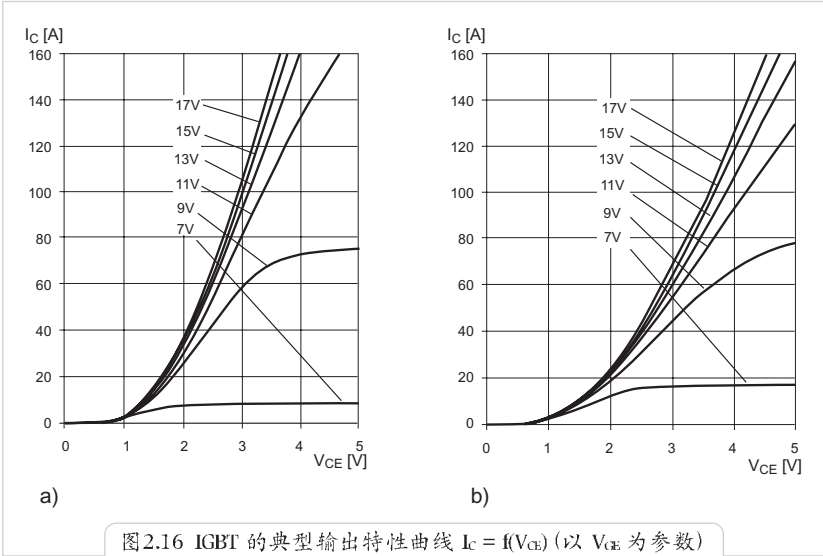
见 3.6.2 节

集电极电流的最大定额与芯片温度的关系。

见 3.6.2 节，类同图 2.23b

正向输出曲线 $I_C = f(V_{CE})$

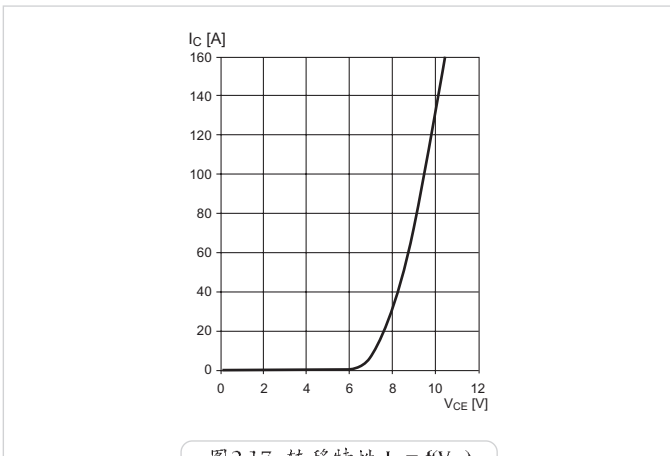
以 V_{GE} 为参数，图 2.16 显示了 $T_j = 25^\circ\text{C}$ 和 125°C 时 IGBT 的输出特性曲线（典型值），参阅 1.2.2.2 节和 2.6 节。



转移特性 $I_C = f(V_{GE})$

转移特性 (图 2.17) 描述了 IGBT 在主动区域 (线性工作区域) 内当 $V_{CE} = 20\text{V}$ 和 $t_p = 80\mu\text{s}$ 时的特性。此时, 集电极电流通过转移电导与栅极-发射极电压相耦合。

$$I_C = g_{fs} * (V_{GE} - V_{GE(th)})$$



栅极电荷特性

见 1.2.3 节

寄生电容与集电极—发射极电压的关系

见 1.2.3 节

开关时间与集电极电流的关系

图 2.18 包含了各种开关时间（开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 、上升时间 t_r 、关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 、下降时间 t_f ）与集电极电流 I_C 的典型关系曲线。此时的负载为感性，IGBT 工作在硬开关条件下。

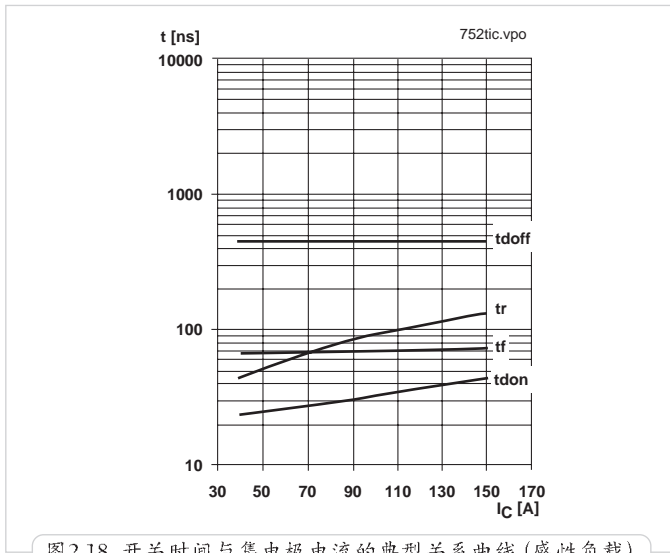


图 2.18 开关时间与集电极电流的典型关系曲线（感性负载）

与 I_C 相比， t_r 的增长略为快一些，这表明了 di_C/dt 的增长小于 I_C 的增长。

开关时间与栅极电阻的关系

见 3.5.2 节

CAL 型续流二极管的通态特性

见 1.3.1.1 节

续流二极管的关断能耗

当续流二极管向 IGBT 换流时（硬开关），二极管的关断能耗 E_{offD} 与它关断前的电流 I_F 以及 IGBT 的开通速度有关，图 2.19 显示了这一关系。IGBT 的开通速度由栅极电阻 R_G 所决定。

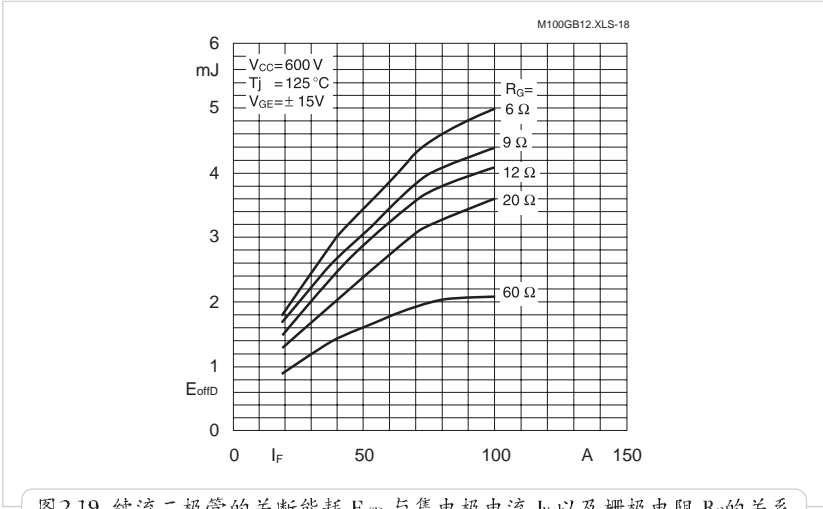


图2.19 续流二极管的关断能耗 E_{offD} 与集电极电流 I_F 以及栅极电阻 R_G 的关系

正如所预期的那样，续流二极管的关断能耗随通态电流与换流速率的增加而增加，原因是存储电荷与反向恢复电流峰值都会增加(见1.3.1.3节)。

IGBT 和续流二极管的动态热抗

见 3.2.2.3 节

续流二极管的反向恢复电流与通态电流的关系

图 2.20 显示了反向恢复电流的峰值 I_{RRM} 与关断前的通态电流 I_F 以及换流速率的典型特性。换流速率由栅极电阻 $R_G = R_{Gon}$ 所决定。

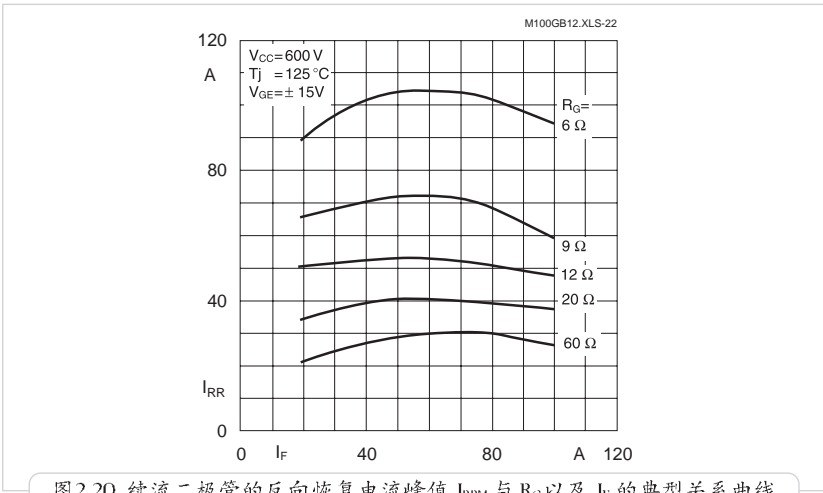


图2.20 续流二极管的反向恢复电流峰值 I_{RRM} 与 R_G 以及 I_F 的典型关系曲线

正如所预期的那样, IGBT 开通越快 (栅极开通电阻 R_{Gon} 愈低), 则反向恢复电流的峰值越大。

当通态电流增加时, 反向恢复电流的峰值首先是增加。但当集电极电流已经较高时, 随着换流时间的延长, 使得 CAL 二极管内漂移区的载流子被逐渐中和。因此, 在大电流时, I_{RRM} 反而重新下降。

续流二极管的反向恢复电流与 di_F/dt 的关系

图 2.21 显示了续流二极管的反向恢复电流与 di_F/dt 的典型特性。在图中所给定的条件下, di_F/dt 的变化是由调节 IGBT 的栅极电阻 $R_G = R_{Gon}$ 来实现的。

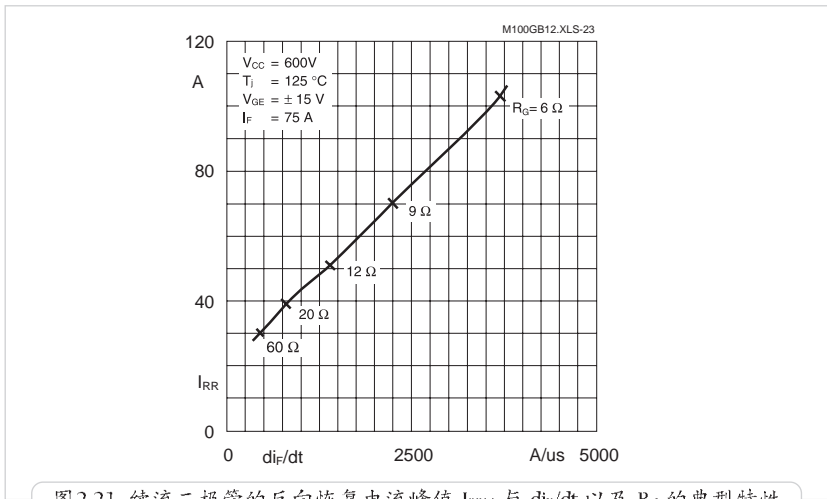


图 2.21 续流二极管的反向恢复电流峰值 I_{RRM} 与 di_F/dt 以及 R_G 的典型特性

反向电流峰值与换流速率 di_F/dt 几乎呈线性关系。

续流二极管的反向恢复电荷与 di_F/dt 的关系

图 2.22 显示了不同集电极电流 I_C 下续流二极管的反向恢复电荷 Q_{rr} 与 di_F/dt 的典型特性曲线。另外, 图中还标出了栅极的开通电阻, 它被用来控制测量过程中的 di_F/dt 。

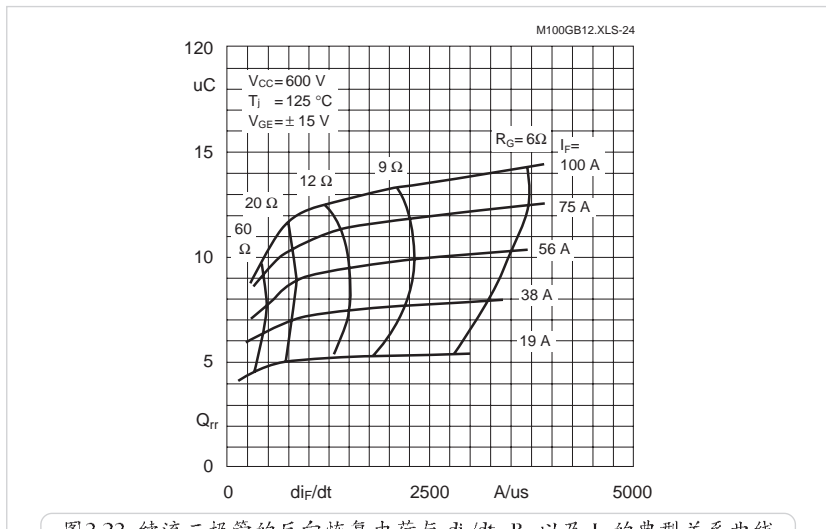


图2.22 续流二极管的反向恢复电荷与 di_F/dt 、 R_G 以及 I_C 的典型关系曲线

与反向恢复电流的峰值一样，续流二极管的反向恢复电荷也是随着集电极电流和 di/dt 的增加而增加。在集电极电流较大时，这一增长要比在集电极电流较小时更快一些。

负载短路状态下的集电极电流与栅极—发射极电压以及温度的关系

见 3.6.2 节