

3.7 阻断特性

IGBT 的特性通常是指阻断正向电压的情况,而反向阻断能力一般不在数据手册中提及,一般可以认为 IGBT 反向阻断能力要明显地低于正向阻断能力。由于 IGBT 通常会反并联续流二极管,所以对实际应用并没有什么不良影响。除了由于二极管换流造成的反向电压过冲的场合外,IGBT 的反向阻断能力不是必需的,这一点在 3.3.1 节和第 7 章 7.9 节提及。在实际应用中,如果需要特别的反向阻断能力,可以把 IGBT 和一个二极管串联使用,从而获得反向阻断能力。

IGBT 的正向阻断能力通常决定了它的电压等级。比如一个 600V 的 IGBT,其正向阻断电压为 $U_{CES}=600V$ 。不论是动态电压还是静态电压,IGBT 的工作电压不可以超过数据手册中给出的 U_{CES} 。在 $T_{vj}=25^{\circ}C$ 时, U_{CES} 比击穿电压 $U_{(BR)CES}$ 低,这是由于厂商为了安全,保留一定的裕量。

当 IGBT 关断时,由于热能的作用,会产生一个很小的集-射极漏电流 I_{CES} 。实际应用中的 I_{CES} 通常达不到数据手册中给出的数值。数据手册给出的通常是 IGBT 模块生产终测时设备所能检测到的最小电流,而这个下限电流比实际的截止电流要高出几个数量级。相应地,由 U_{CES} 和 I_{CES} 相乘而得到断态损耗功率非常小。断态损耗功率相比其他的损耗(通态及开关损耗)来说是可以忽略不计的。

除了热能外,宇宙射线也可以产生漏电流 I_{CES} (详见第 14 章 14.8 节)。宇宙射线的影响与器件工作环境的海拔相关,也与结温、断态电压及额定电压相关。器件工作的海拔越高,损坏的可能性就越高。这一点可以通过 FIT[⊖]来说明。图 3.34 给出了阻断电压与结温的关系。

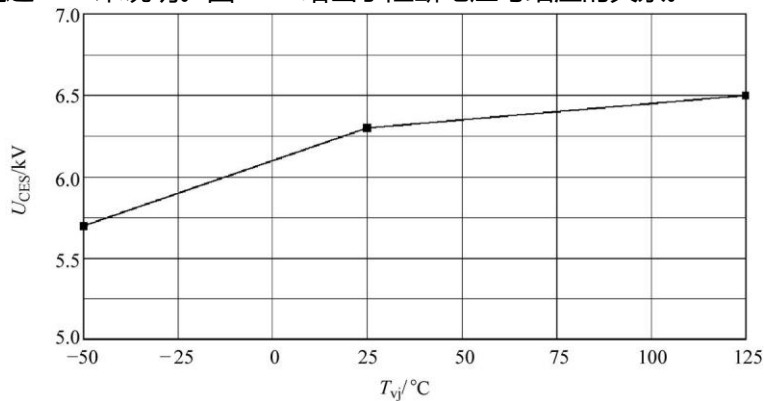


图 3.34 阻断电压与结温的关系(以 6.5kV IGBT 为例)

⊖ FIT 代表了故障时间(详见第 14 章 14.1.1 节)。

3.8 静态和动态雪崩击穿

如果 IGBT 工作在高于集-射极断态电压 U_{CES} 时,就可能会出现雪崩击穿(详见第 1 章 1.6 节)。如果 PN 结中 P 区和 N 区之间漂移区电场强度过大,那么 PN 结 J_2 就会失去电压阻断能力。如果出现雪崩击穿,晶体中会产生大量的载流子。这样,在正向阻断方向会产生大电流。这种类型的雪崩击穿常常发生于 IGBT 静态关断时,通常会导致器件损坏,如图 3.35 所示。

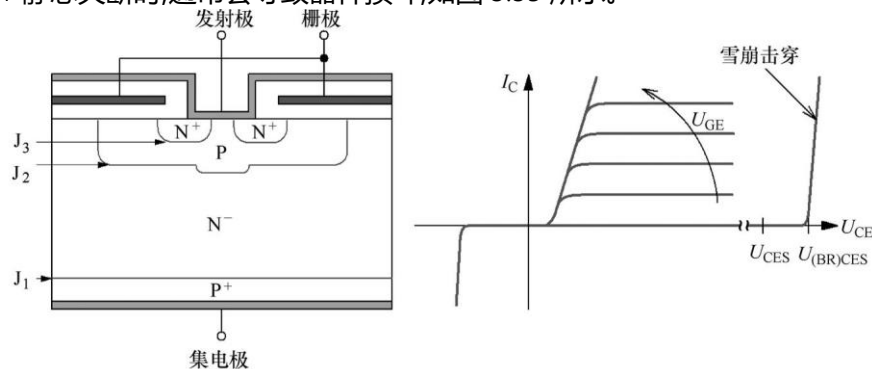


图 3.35 IGBT 静态雪崩击穿

在 IGBT 关断时,伴随着大电流和高电压的出现可能会导致动态雪崩击穿。

这种击穿机理类似于二极管的雪崩击穿,下面将会详细讨论。如果此时没有超出 IGBT 的安全工作区(SOA),那么器件就不会损坏。NPT IGBT 和 FS IGBT 在动态雪崩时会将最大过冲电压限制在某个值,而这个值会高于 IGBT 的击穿电压 $U_{(BR)CES}$ 。图 3.36 给出一个此类的例子,一个 1.2kV 的 NPT IGBT 在动态雪崩击穿时,集-射极之间的电压达到了 1850V。此时 IGBT 的工作状态超出了安全工作区的范围,因此必须禁止 IGBT 工作于这种状态。最新的 IGBT 技术以降低动态电压限制为目标,使其低于击穿电压从而保护 IGBT 不被损坏。这类技术被称作“动态钳位”或者“开关自钳位模式(SSCM)”。

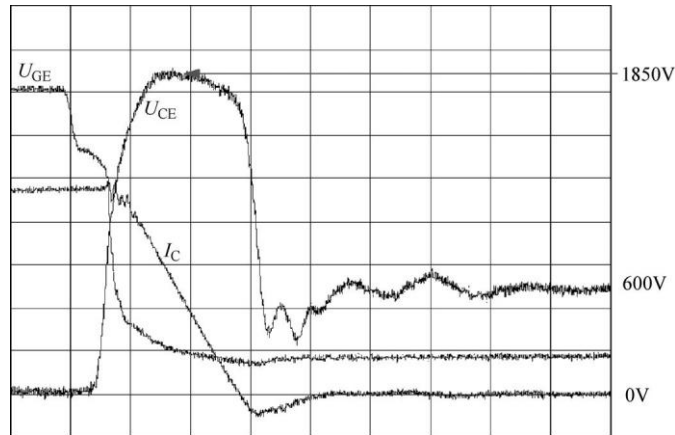


图 3.36 1.2kV NPT IGBT 高于静态击穿电压的动态限制电压

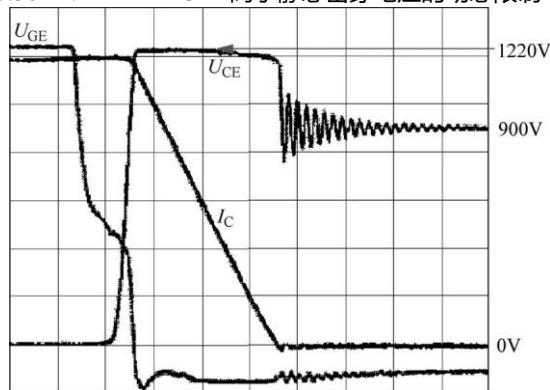


图 3.37 自限压的 1.2kV IGBT,其集-射极电压可以被限制到额定静态击穿电压

通过内部结构和掺杂浓度的调整,已经可以实现动态钳位的 IGBT,详见参考文献【14】、【15】和【16】。当然,到量产还需要一定的时间。图 3.37 给出了自限压的 1.2kV IGBT,其集-射极电压可以被限制到额定静态击穿电压。

像 IGBT 一样,续流二极管也可能发生雪崩击穿。续流二极管关断期间,尽管已经开始形成反向阻断能力,但是仍然会导致明显的反向恢复电流。反向恢复电流以空穴的形式穿过空间电荷区,流向正极。根据式(1.51),由于空穴电流产生的载流子浓度 P 和漂移区的载流子浓度 N_D 相加,从而降低了二极管的阻断能力。等效的掺杂为

$$N_{D,eff} = N_D + P(3.33)$$

动态雪崩击穿会在低于二极管实际阻断电压的情况下发生(与二极管的静态击穿特性相反)。相应的 IGBT 在换流过程中开通得越快,且换流电流的变化率越高,动态雪崩击穿就发生得越快。但是这种效应实际上已经被补偿了一部分,因为雪崩击穿时产生的电子(电子和空穴成对出现),通过 PN 结向 N 区(阴极)漂移并与 N 区的空穴复合。如果发生二次击穿,二极管可能被损坏。

在大电流变换率和高直流母线电压的情况下,一个强壮的二极管能够在发生雪崩击穿时不被损坏。