

1.3.4.3 混合二极管方案

混合二极管的原理早在 1991 年就被提出过 [295]、[296]。如图 1.37 所示，该方案在一个具有较低通态压降但具有刚性恢复特性的 PT 二极管旁并联了一个软恢复二极管。

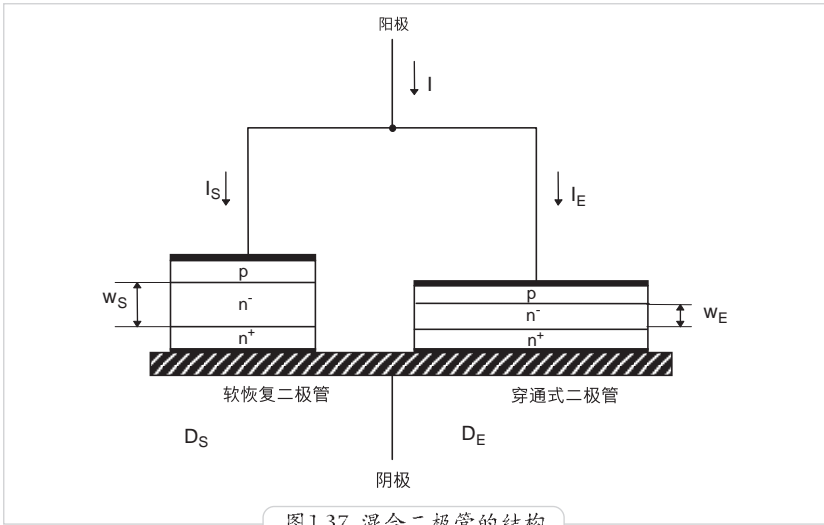


图 1.37 混合二极管的结构

图 1.38 显示了其基本运行原理。刚性二极管 D_E 承受了导通电流的大部分，而二极管 D_S 则承受了其余部分。通过二极管 D_S 的电流 I_S 首先到达零点，并在时刻 t_1 时达到其恢复电流的峰值。此时，二极管 D_E 仍然流动着正向电流。在时刻 t_1 ，二极管 D_S 的 pn 结已经不含载流子。然后，二极管 D_E 在 dI/dt 升高时换流。总电流仍由外电路所给定。

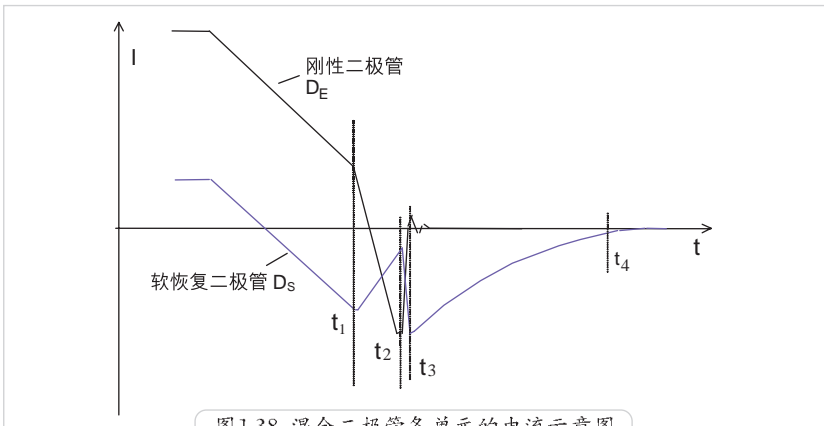


图 1.38 混合二极管各单元的电流示意图

在时刻 t_2 , D_E 的 pn 结也不含载流子。在 t_2 和 t_3 区间内, D_E 产生一个刚性的恢复电流。在二极管 D_S 中的反向电流也以同样的速率增加, 其原因是在该时刻它的载流子还未被完全清空。总电流并未显示出反向电流陡降的现象, 因此并没有过电压产生。在 t_3 和 t_4 之间, 二极管 D_S 的电荷载子密度逐步下降。整个组合显示出软特性。

为了使混合二极管有效地工作, 二极管 D_S 必须在 D_E 的反向恢复电流陡降之后还能够提供足够的电荷。为此, 软恢复二极管 D_S 需承受约为 10—25% 的通态电流。所以两者的导通电压需要彼此协调好。

最早采用混合二极管方案的模块已于 1996 年初问世。其应用范围主要是被用做直流斩波器中 100V 或 200V—MOSFET 开关的续流二极管。在那里, 作为刚性二极管的 D_E 人们采用了 400V 的外延生长型二极管, 而作为软恢复二极管的 D_S 则为一个改进的 CAL 二极管。再结合中心的本征密度被维持在一个较低的水平, 从而使通态压降在 $150\text{A}/\text{cm}^2$ 时仅为约 1.1V。

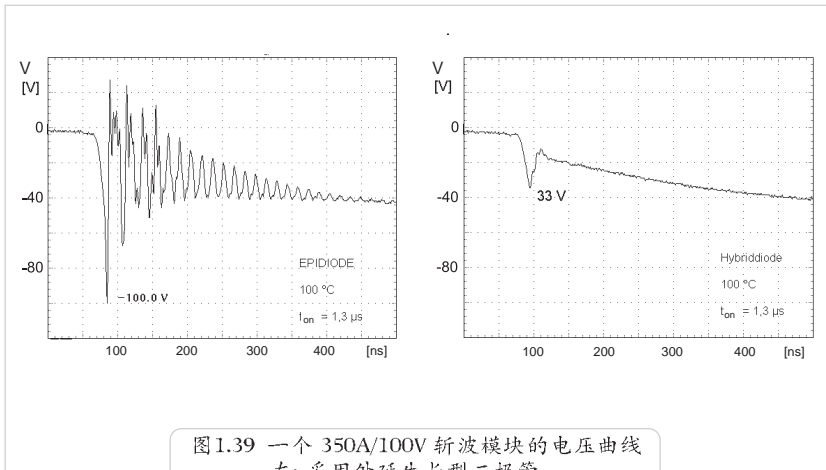


图1.39 一个 350A/100V 斩波模块的电压曲线
左: 采用外延生长型二极管
右: 采用混合二极管

图 1.39 显示了一个 350A/100V 斩波模块在 MOSFET 开通时的实测电压。

图 1.39 的左图显示了当续流二极管由七个外延生长型二极管并联组合时的电压曲线。

图 1.39 的右图显示了当其中一个外延生长型二极管被一个软恢复二极管 D_S 所替代时的电压曲线。这时, 感应的电压峰值从 100V 降到 33V, 振荡波形消失。利用一个如此的续流二极管可以使 MOSFET 在更高的 dI/dt 条件下开通。如果降低栅极电阻使 MOSFET 的开通时间从 1.3 秒降至 0.3 秒, 则所得到的电压曲线还是可以接受, 但电路的总损耗 (所有元件的通态和开关损耗之和) 却可以降至先前的 48%。

混合二极管特别是在 600V 及以下的范围内具有特别的优点。在这个范围内,作为混合二极管组合成分的二极管的 w_B 可以调至最小。对更高的电压来说,因为在基于 CAL 方案的软恢复二极管和 PT 二极管之间,二者 w_B 的区别并不是太大,所以混合二极管的优越性便不再那么突出。