

新型 1200V SPT⁺芯片技术和 17mm 的 IGBT 功率模块平台——最先进逆变器

设计的理想组合

C. Daucher*, D. Seng**, A. Wahi**

* SEMIKRON Elektronik GmbH & Co. KG, Sigmundstrasse 200, D-90431 Nuernberg, Germany

**SEMIKRON International GmbH, Sigmundstrasse 200, D-90431 Nuernberg, Germany

Aseem.Wahi@semikron.com, +49 (911) 6559-243

摘要

在具有重要意义的 1200V 电压等级的市场上，SEMIKRON 推出了 17mm 厚的扁平化的采用 SEMIX 功率模块封装的下一代软穿通（SPT）IGBT，即 SPT⁺，作为今后开发其它产品的产品平台。

和以前的软穿通芯片模块相比，SPT⁺模块的开关损耗和导通损耗都要低。芯片的自锁模式及其极富创新的 SEMIX 封装使得客户可以容易地设计出成本低，结构紧凑的逆变器。本文介绍了 SPT⁺的电气性能测试结果并和以前的 SPT 芯片进行了比较。

简介

现代逆变器设计的主要目的就是不增加成本的情况下减小它的体积，增加功率等级和逆变器功能。直到最近，为了实现最低的功率损耗而选用正确的硅技术一直是人们首先考虑的最重要的因素之一。现今由于 IGBT 技术的成熟，其它的一些因素如模块的动态特性（电磁兼容性，过压），封装设计以及运行参数等都变得同等重要了。

a) SPT⁺芯片

软穿通芯片（SPT）设计是基于平板型门极/非穿通型 IGBT 技术基础上的。与其它的一些 IGBT 技术相比，在大多数应用中，它具有如下一些优势，如低开关损耗，大的芯片规模，正的温度系数以及比较低的晶片生产成本。SEMIKRON 在 2003 年就已成功地将这种芯片用于他们标准的 75A 以上的模块系列当中。

去年，SEMIKRON 发明了 SPT⁺ IGBT 技术，现今该技术已经实现产业化〔1〕。将平板型门极结构和软穿通 n⁺缓冲层相结合就形成了 SPT⁺芯片。

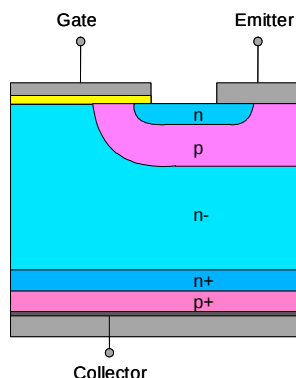


图 1 平板型 SPT⁺ IGBT 基本单元的结构原理图

与早期的软穿通 IGBT 芯片相比，新型的软穿通技术 SPT⁺改善了载流子的分布图。这种改进减小了芯片尺寸并改善了它的电性能。然而芯片的性能还极大地取决于芯片的封装设计技术。

b) SEMIX 封装平台

SEMIKRON 推出了用于 IGBT 模块封装的最高技术水平的封装平台 SEMIX(图 2)，如今它也用在整流桥的封装上（3）。SEMIX 最明显的特征就是 17mm 高的交流端子和直流端子分别位于封装外壳的两个相对的边上，而其它的辅助接触端子是采用弹簧来实现的。这种封装结构使其使用者可以轻易对输入和输出部分进行分离，从而实现低感直流母排的布线。门极驱动电路可以不通过焊接直接安装在功率模块的上面。因此就不需要门极配线从而消除了门极信号受电磁干扰而发生畸变的危险。



图 2 带簧片的用作辅助触点 SEMIX3 封装

SPT/SPT⁺的比较

分别将 SPT⁺ IGBT 芯片和 SPT IGBT 芯片与 SEMIKRON 的受专利保护的轴向载流子寿命控制续流二极管（CAL FWD）进行装配，并用 SEMIX3 封装，将获得的 300A/1200V 模块用于进行比较性测试。其中每个开关管使用三个并联的 100A IGBT 芯片。测试的结果如表一所示。

$I_{C, nom} = 300 \text{ A}$	SPT	SPT ⁺
$V_{CE, sat}@125^{\circ} \text{ C [V]}$	2, 1	2, 0
$E_{on} [\text{mJ}] @ R_{g, nom}$	22, 5	19, 5
$E_{off} [\text{mJ}] @ R_{g, nom}$	34, 5	33
$di/dt_{max} [\text{A}/\mu\text{s}]$	5250	5600
$V_{CE max} [\text{V}]$	797	748
100A chip size [mm ²]	158	134

表. 1: 电气参数（典型值）比较

为了达到最高的性价比，对 SPT⁺芯片的尺寸进行了优化，在同样电流等级的情况下 SPT⁺芯片的尺寸比 SPT 的约减少 15%，它等效于电流密度增加了 19%（以芯片总面积进行计算）。尽管 SPT⁺芯片体积减小了，但 V_{cesat} 和传递的能量却增加了。

芯片体积缩小使得同样的封装尺寸可以实现更高的电流等级，从而提高它的价值。

关断特性

图 3 和图 4 是 IGBT 关断时 SPT 模块和 SPT+模块的电流和电压波形。即使 SPT+所测试到的最大的 di/dt 值比 SPT 稍高，但在同样的条件下由此产生的电压过冲（图 4）仍保持在 50V，比 SPT 的过冲低，这主要是因为 SPT+的关断特性比 SPT 的还要软。这种更软的关断特性是通过优化的 n+缓冲层实现的。

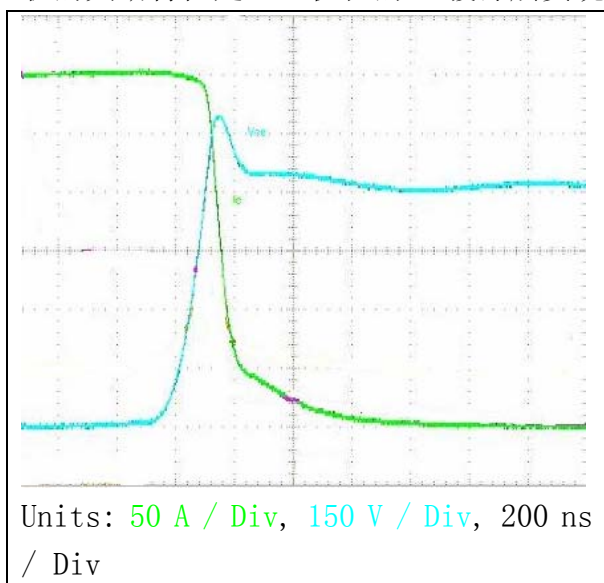


图 3 SPT 在 $V_{CC}=600V$, $I_c=300A$, $T_j=125^\circ C$, $V_{GE}=\pm 15V$, $R_{Gon}=R_{Goff}=3$ 时的关断特性

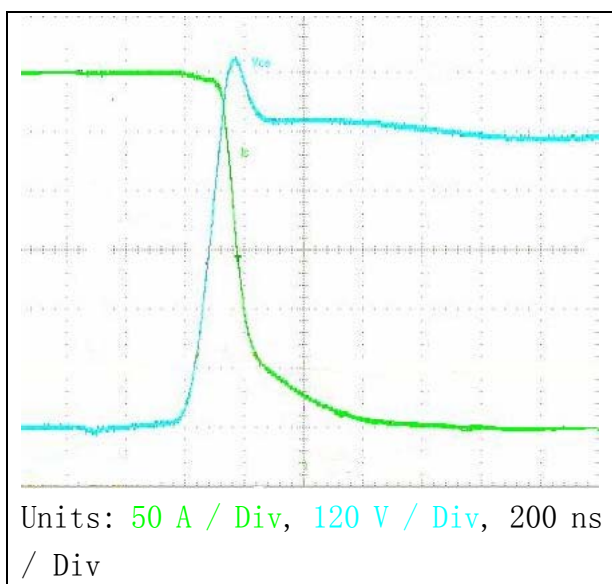


图 1 SPT+ 在 $V_{CC}=600V$, $I_c=300A$, $T_j=125^\circ C$, $V_{GE}=\pm 15V$, $R_{Gon}=R_{Goff}=2,7$ 时的关断特性

由于 SPT+的开关特性得到优化，因此开关损耗降低了 8%（图 5）。

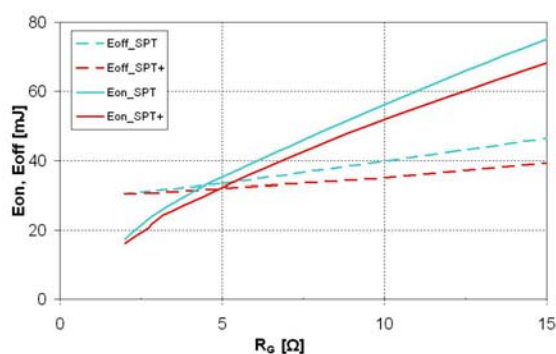


图 5. SPT 和 SPT+的开关损耗

短路特性

短路特性是决定器件坚固耐用性的一个重要的特征。对 IGBT 模块而言，“硬”的短路，即电路中有电流限制作用的非常低的电感是不利于器件对抗短路的。

图 6 显示了 R_{goff} 等于 10 时的 300A SPT+模块的短路测试结果。可见，发生短路后，电流被限制在 6 个 $I_{C, nom}$ 以下，10 μ s 后就可以被平滑地关断。

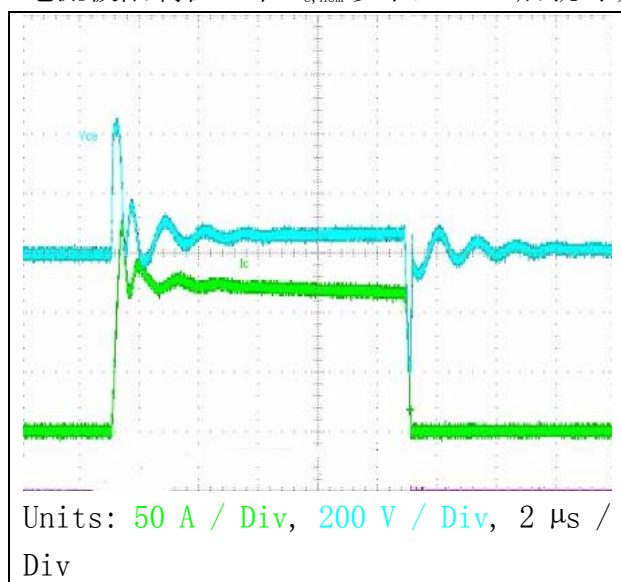


图 6 SPT+在 $V_{cc} = 600V$, $I_{C, max} = 1760 A$, $T_j = 125^\circ C$, $V_{GE} = \pm 15V$, $R_{Gon} = 2$ $R_{Goff} = 10$ $L_{CE} \approx 40 nH$ 硬短路时的关断特性

当使用的门极电阻阻值比较低时，为了限制电流过冲，建议使用软关断技术。技术最先进的门极驱动电路即 SEMIKRON 的“SKYPER PRO” [4]能够监测到短路的发生并在这种关断的情况下给电路增加一个额外的电阻。

开关自钳位模式

如今越来越多的逆变器工作在更高的直流电压 V_{cc} 下。在 UPS 的应用上这种趋势更加明显。更高的直流电压的优点就是在相同的电流的情况下输出功率更高，或在同样输出功率的情况下电流更小，而缺点就是需要技术更复杂，成本更昂贵的钳位电路来最小化电压的过冲。

根据方程 $V = -L \cdot \frac{di}{dt}$ ，在 IGBT 关断时，直流部分会产生一个电压过冲。因此 IGBT 的最大阻隔电压 $V_{CE, max}$ 可能被超过，从而被击穿。

SPT⁺有自钳位特性。这就意味着电压过冲可被钳位到稍低于 $V_{CE, max}$ 的电压值。

图 7 和图 8 是在没有额外的钳位电路，非常高的直流母线电压 $V_{CC}=900V$ 以及不同的关断门极阻抗 $R_{G, off}$ 下的关断特性图。理论上讲，不同的门极阻抗会导致不同的 di/dt ，从而产生不同的远大于 $V_{CE, max}$ 电压过冲，可是，由于 SPT⁺的自钳位特性，两种情况下的 V_{CE} 值都没有超过 1250V。

因此 IGBT 可以实现自我保护。即使如此，如果 $V_{CE, max}$ 超过了产品手册中 1200V 的最大给定值，仍然需要采用低感设计和吸收电容。

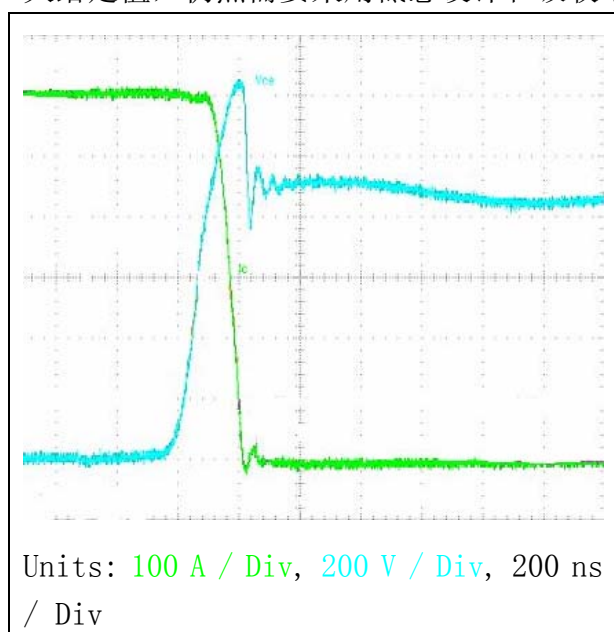
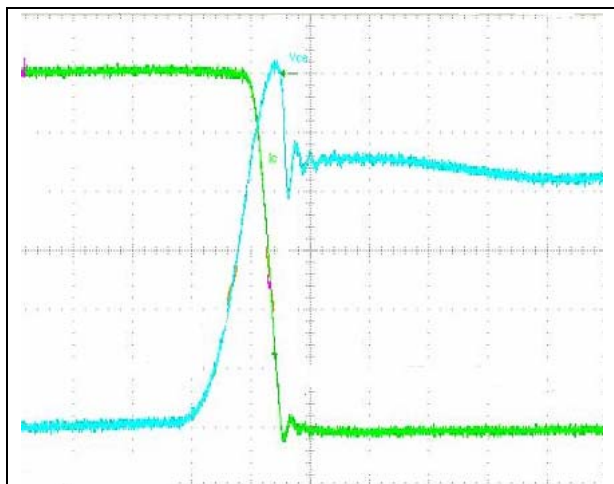


图 7 在高直流母线电压 $V_{CC}= 900V$ ， $V_{CE, max} = 1248 V$ ， $T_j= 25^{\circ} C$ ， $V_{GE}= \pm 15V$ ， $R_{Gon}= 2,5$ ， $R_{Goff}= 3,0$ 时的关断特性图



Units: 100 A / Div, 200 V / Div, 200 ns / Div

图 8、在高直流母线电压 $V_{CC}=900V$, $V_{CE, max}=1248V$, $T_j=25^\circ C$, $V_{GE}=\pm 15V$, $R_{Gon}=2,5$
 $R_{Goff}=8,2$ 时的关断特性图

逆变器的性能和设计

图 9 是安装在标准 SEMIKRON 散热器上的 SPT⁺ IGBT 芯片工作在典型的逆变模式下的电流输出有效值与开关频率的关系图。从图可见, SPT⁺ 在开关频率低于 5kHz 时比 SPT 有更好的性能。而当开关频率继续升高时, 更高的总体功率损耗, 更大的热阻 R_{thcs} (封装—散热器) 和 R_{thsa} (散热器—外部环境) 都变成限制性的不利因素。

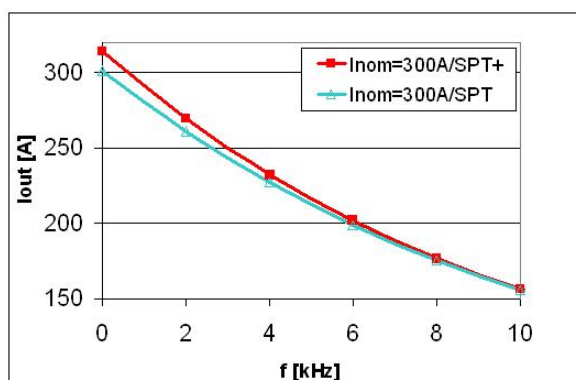


图 9 模块输出电流于开关频率的关系; 条件: $\cos = 0,85$, $V_{cc} = 600V$, $T_a = 40^\circ C$, $R_{thsa} = 0.025K/W$, $T_j = 125^\circ C$

新型 SPT⁺ 芯片技术加上创新的 SEMIX 封装模块平台使得设计工程师可以轻易地实现高度紧凑的模块排列设计。图 9 是一个体积小, 可实现机架安装的模块排列的例子。它由 SEMIX 2 半控输入整流桥加上 SEMIX 3 双 IGBT 模块组成, 可安装到 19” 的标准的电柜中。其额定级别是 320A/185kW。



图 10 由 SKYPER PRO 驱动的用 SEMIX 整流

桥和 IGBT 模块构成的小体积的逆变器系统

内置 1200V SPT+芯片组的 SEMIX IGBT 模块系列, 额定电流从 75A—600A, 采用六管封装, 内置斩波器。

结论

与现有的产品系列相比, 内置 SPT+芯片的 SEMIX IGBT 模块的导通损耗和关断损耗都降低了, 更为重要的是, 更软的关断特性使得电压过冲更小。自带的自钳位特性增加了器件在极端工作条件下的可靠性。这些特性加上 SEMIX 模块线性排列的小体积设计可使客户轻易地实现紧凑的系统设计。

参考文献:

- [1] M. Rahimo et al., *“SPT, the Next Generation of Low-Loss HV-IGBTs”*; Proceedings PCIM '05, Nuremberg, Germany, 2005
- [2] M. Rahimo, A. Kopata, S. Eicher; *“Next Generation Planar IGBTs with SPT”*; Power Electronics Europe, Issue 06, 2005
- [3] R. Annacker, T. Grasshoff; *“SEMiX - A new platform for IGBT modules”*; PCIM Europe, Issue 08, 2003
- [4] M. Hermwille, T. Grasshoff; *“SKYPER - Modern and Simple Driver”*; Power Systems Design, Issue 05, 2004