

单螺钉安装的SEMITOP功率模块的设计

Fabio Brucchi, SEMIKRON Italia

赛米控公司通过推出SEMITOP[®] 4系列，一种可以用于功率高达22kW电机驱动器的功率模块，提升了SEMITOP[®]现有产品系列的功率范围。它和现存的模块SEMITOP[®] 1,2,3完全兼容，该系列有3相IGBT、MOSFET管逆变器以及集整流、刹车、逆变于一体的拓扑结构。其中SEMITOP[®] 4的IGBT逆变模块的最大功率是SEMITOP[®] 3标准逆变模块的三倍多。为了获得上述性能，设计时采用了改善过热性能的不同衬底材料。在SEMITOP[®] 4的设计中使用了机械和热有限元仿真软件以处理在最恶劣的环境条件下在机械和热性能方面任何可能存在缺陷。在该软件的协助下，还实现了不同于以前的一种电力电子设计新方法。

电力电子产品对功率模块在成本、效率和性能方面的要求日益增高。由于电力电子产品自身功率密度不断增加以及成本限制越来越严，新型功率模块的热计算、电气尺寸以及设计比以往任何时候都重要，这是因为功率模块设计时的温度安全裕度被不断的缩减[1], [2], [3], [4]。

不断减小安全裕度的这种趋势，使得在设计成功可靠的电力模块时，二次热问题（热交叉，等温线畸变及边界效应等）的知识就变得非常的重要。在考虑上述因素的基础上，赛米控设计了新型的功率模块 **SEMITOP[®] 4**（图 1）。在设计这些模块时使用了机械和热有限元仿真软件。这种单螺钉安装的无基板的新型功率模块在提供低成本方案的基础上扩充了SEMITOP[®]产品系列的功率范围，从而提高了产品性能。

SEMITOP[®] 4的工艺参数

新型功率模块的外围尺寸如下：

W=60mm L=55mm H=12mm (图. 1)，它和SEMITOP[®] 1, 2, 3系列完全兼容，也就是说，在同样的电路板，同样的散热器上，新型模块可以和SEMITOP[®] 1, 2, 3模块结合使用。



图1 SEMITOP[®] 4

功率模块的拓扑结构有三相 IGBT/MOSFET，集整流、刹车、逆变于一体。目前 **SEMITOP[®] 4** 的产品目录如表 1 所示。从参数可见 **SEMITOP[®] 4** 封装的 IGBT 逆变模块和集成功率模块的最大功率等级是 **SEMITOP[®] 3** 的 3~4 倍。对于 600V 电压等级的功率模块，**SEMITOP[®] 4** 封装的 IGBT 逆变模块的功率密度比 **SEMITOP[®] 3** 模块增加了 47%，而 1200V 等级的模块，**SEMITOP[®] 4** 封装的 IGBT 逆变模块的功率密度则增加了 38%。

	I_c @ $T_s=25^\circ\text{C}$	I_c @ $T_s=80^\circ\text{C}$
GD126 Version		
3-Ø 1200V IGBT Inverter	100A	70A
3-Ø 1200V IGBT Inverter	77A	53A
3-Ø 1200V IGBT Inverter	65A	43A
GD066 Version*		
3-Ø 600V IGBT Inverter	155A	110A
3-Ø 600V IGBT Inverter	117A	82A
3-Ø 600V IGBT Inverter	84A	55A
DGDL126 Version		
CIB 1200V	60A	40A
CIB 1200V	45A	30A
DGDL066 Version*		
CIB 600V	90A	70A
CIB 600V	75A	56A
MD Version		
3-Ø 100V MOSFET Inverter	165A	125A
3-Ø 55V MOSFET Inverter	225A	170A

* $T_{j(\text{MAX})} = 175^\circ\text{C}$

表一：SEMİTOP®4产品目录

为了达到上述性能，SEMİTOP®4采用了上下表面分别敷铜的具有不同厚度绝缘体的衬底，并对其热性能进行了改进。赛米控选择的衬底是一层经过Curamik®预弯技术处理的0.38mm厚的三氧化二铝。这种衬底特别适合用于无基板的模块，它可以促进导热胶的均匀分布，并将功率模块100%的胶粘到散热器表面上去，即使功率模块只使用一个螺钉来进行安装。和SEMİTOP®3相比，SEMİTOP®4导热胶的厚度并不需要增加。

这种新型的衬底可以将IGBT的热阻降低20%。例如SEMİTOP®4 (1200V / 75A at $T_s=80^\circ\text{C}$)封装的SK75GD126T逆变器典型的热阻是0,39K/W。而SEMİTOP®3封装中同样的硅方块的热阻 $R_{th(j-s)}$ 是0,49K/W，可见，热阻约降低了20%。赛米控在模块的机械和热设计上花费了相当多的精力。

机械仿真与设计

为了满足日益增长的对品质提升的要求以及避免衬底上可能存在的机械应力缺陷点的存在，我们对不同的形状，结构和封装材料进行了机械有限元分析（5）。这种分析方法，减少了通过铣床和测试用塑胶模工具在制造试验封装时所做的一些费用较大的测试。更为重要的是这些仿真手段减少了产品研发的时间以及最终产品上市的时间。

图2夸张地显示了用标准聚合物（ABS）制造的SEMİTOP®4封装原型的机械形变。很容易发现当在中心螺钉上施加额定扭矩时封装将产生过大的形变（超过1.3mm）。但是通过使用GF紧固材料和其它的一些塑胶材料，则可获得均匀的机械压力分布，这极大地限制了封装的形变。

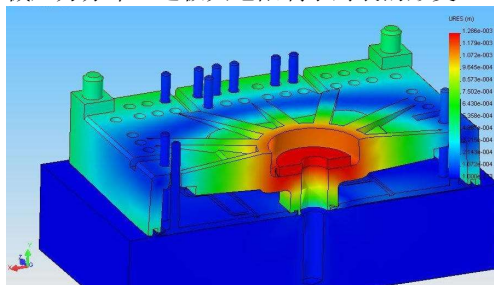


图2 SEMİTOP®4的机械形变和压力分布图

热仿真与设计

如前所述，因为功率密度增加以及电力电子产品成本上的限制，新型功率模块设计时的热计算和体积就变得非常重要。因此，做每个设计，特别是应用于硅片并联的设计时，绝对有必要去收集大量而广泛的“二次热现象”如热瞬态过程，热串流，等温线畸变以及边界效应等[6], [7], [8], [9], [13], [14]。迄今为止，并联硅块的热阻计算主要是基于测试基础上通过降额因子来简化处理的。同时，边界效应、热串流、等温线畸变以及这些效应相互之间的作用基本上都被忽略了。

随着用户界面友好的有限元软件的出现以及计算机计算能力的增加，在短时间内就有可能从一个3D文件或一个2D-CAD文件产生一个有限元模型，从而在数小时内就可得到完整而详细的衬底设计分析报告，因此大量的有限元模型以及大量的数据管理都是在非常高效的状态下完成的（一个完整的有限元模型要花费几天的时间，因此迄今用标准的有限元软件和普通计算机仍然不可能完成上述任务）

SK100GD126T IGBT=2×57mm ² FWD=61mm ²	Measured R _{th(j-s)} [K/W]	FEA R _{th(j-s)} [K/W]	Diff [%]
IGBT (top 1)	0,42	0,427	1,6
IGBT (top 2)	0,39	0,397	1,8
IGBT (top 3)	0,41	0,403	-1,7
IGBT (bottom 1)	0,44	0,437	-0,7
IGBT (bottom 2)	0,39	0,393	0,8
IGBT (bottom 3)	0,43	0,436	1,4
FWD (top 1)	0,62	0,625	0,8
FWD (top 2)	0,61	0,621	1,8
FWD (top 3)	0,69	0,686	-0,6
FWD (bottom 1)	0,67	0,674	0,6
FWD (bottom 2)	0,68	0,669	-1,6
FWD (bottom 3)	0,68	0,675	-0,7

表2 IGBT模块和续流二极管(SK100GD126T)的测试R_{th(j-s)}和仿真R_{th(j-s)}的对比表

我们可以对每个定制的设计方案的R_{th(j-s)}的分布进行验证，并对每一个可能的热缺陷点进行识别。而最终可能的缺陷点通常会和最终客户进行讨论以评估在实际应用中会发生的危险反应。表2是每个IGBT模块和续流二极管的R_{th(j-s)} [12]的测试值和有限元仿真结果的比较，很容易看出仿真结果和测试结果的一致性很好。

第二种情况下，选择位于同一个平面坐标系，而仅在垂直的Z-轴方向上变化的测试点（分别对应于T_j和T_s）非常重要（见图3.a和3.b）。同一硅模型中的温度（主要是并联的硅片）在好几度的范围内变化（例如图3.a中的T_j从114℃变到96℃），所以选择不正确的测试点可能会证伪仿真结果[10]。

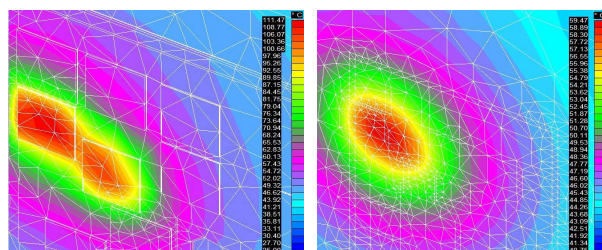


图3 P_D=121.6W时R_{th(j-s)}的测试结果
在逆变模块IGBT_{TOP1} SK100GD126T上测得的

此外我们还发现，在仿真时降额系数还极大地受到模型尺寸以及模型到衬底边界距离的影响。实际上在同样的功率散耗水平和测试条件下，有邻近矩形短侧面的并联硅片比邻近长侧面的并联块的 $R_{th(j-s)}$ 减少5%~16%。该百分比数值随并联硅片的联数增加而增加，但随块间距离增加而减小。图7显示了 $R_{th(j-s)}$ 是块间距离和邻近侧面长度的函数。需要指出的是并联块的位置在图例中有特别说明。这主要是因为等温线畸变和热干扰现象综合作用的结果（我们在保证块到边界距离>5mm的条件以避免边界效应影响的情况下进行了仿真）。

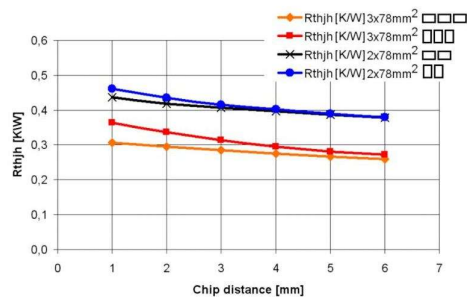


图7 $R_{th(j-s)}$ 是块间距离和邻近块侧边长度的函数

因此在同样的测试条件和硅块全部有效面积相等的情况下，很容易理解并联矩形硅块的 R_{th} 比并联方形硅块的 R_{th} 要小。

测试结果和可靠性

根据表3所列的国际标准，我们进行了可靠性试验[3]。这些测试确认和验证了SEMİTOP®的优良性能和可靠性。测试的重点放在了热周期性试验，负载循环试验以及机械方面的试验。

结论

通过推出新型SEMİTOP®4，赛米控公司丰富了SEMİTOP®产品系列（无基板，单螺钉安装模块）。新型SEMİTOP®4产品上采用了改良过热性能的不同衬底。SEMİTOP®4封装的IGBT逆变模块的最大功率是现有SEMİTOP®3逆变模块的三倍多。在设计这些模块时采用了机械和热有限元仿真软件，以处理即使在最恶劣条件下可能出现的任何机械和热缺陷点。在这种软件的帮助下还实现了一种完全不同的电力电子设计的新方法。

参考资料

- [1] C.Gillot, C.Schaeffer, R.Perret, C.Massit, L.Maysenc: "Double Sided Cooling for High Power IGBT Modules using Flip Chip Technology". IEEE 2000.
- [2] G.Lefranc, A.Schubert, G.Mitic "Reliability and Material Testing of Solders in Power Modules". PCIM2001.
- [3] SEMİKRON Data Book 2005/2006.
- [4] Curamik®: "Design Rules of Curamik® DBCSubstrates". Ed. 04/2003.
- [5] SolidWORKS®: "CosmosWORKS® 2006".
- [6] S.Clemente: "Transient Thermal response of Power Semiconductors to Short Pulses" IEEE Trans. On Power Electronics Vol. 8, No. 4, pp337-341, October 1993.
- [7] C.S. Yun, P.Regli, J.Waldmeyer, W.Fichtner: "Static and Dynamic Thermal Characteristics of IGBT Power Modules".
- [8] M.Maerz, P.Nance: "Thermal Modeling of Power Electronic Systems" Infineon Technologies AG Munich.
- [9] U.Nicolai, T.Reimann, J.Petzoldt, J.Lutz: "Application Manual Power Modules", First Edition, 2000, SEMİKRON International, Editor P.R.W.Martin
- [10] U.Scheuermann, U.Hecht: "Power Cycling Lifetime of Advanced Power Modules for Different Temperature Swings" PCIM2002.
- [11] ANSYS - TAS® – Thermal Analysis System ver 8.2.11/2006 – Ansys, Inc. (Formerly Harvard Thermal, Inc.).
- [12] International Standard IEC 747-8.
- [13] Konrad S. "Ein Beitrag zur Auslegung und Integration Spannungsgespeicherter IGBT Wechselrichter". Dt. Dissertation, TU Ilmenau, 1997, Verlag ISLE, Ilmenau.
- [14] P.Beckedahl, W.Tursky, U.Scheuermann: „Packaging Consideration of an Integrated Inverter Module (IIM) for Hybrid Vehicles" PCIM, Nuremberg Germany 2005.