

电力电子集成模块用平板热管的传热研究

张良华¹, 余小玲², 杨旭¹, 周恩民², 冯全科², 王兆安¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西西安 710049; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西西安 710049)

摘要: 为了解决高封装密度的电力电子集成模块所面临的热集中问题, 本文提出了一种在蒸发端和冷凝端设置有工质回流柱的垂直传热平板热管用以替代传统电力电子集成模块的纯铜基板, 并对该模块的传热性能进行了研究. 研究表明, 在 $186\text{W}/\text{cm}^2$ 的热载荷下, 热管基板蒸发端的高对流换热系数削弱了模块的热集中现象, 其结壳热阻是商用铜基板模块热阻的一半, 并且热管基板在正反放置的情况下具有相同的散热性能. 集成模块在 225W 的脉宽热载荷冲击下, 管芯的瞬态最高温度比商用模块低 46°C .

关键词: 平板热管; 电力电子集成模块; 传热特性; 热路模型

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 08-1848-06

Thermal Characteristic of a Novel Flat Plate Heat Pipe for Hybrid Integrated Power Electronic Module

ZHANG Liang-hua¹, YU Xiao-ling², YANG Xu¹, ZHOU En-min², FENG Quan-ke², WANG Zhao-an¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: This paper presents a novel flat heat pipe filled with negative-ion water to take the place of copper heat spreader of commercial power electronic module to solve the issues of heat concentration. With increasing of dissipated power on the die, the heat transfer coefficient on evaporator increases, and then the thermal flux density vector transfers from heat source to the evaporator vertically. In the condition of $186\text{W}/\text{cm}^2$ thermal load, the junction-to-case (JC) thermal resistance decreases to the half of commercial power module. The dynamic performance shows that the chip temperature is lower 46°C than that of commercial module using 3mm copper heat spreader with 225W pulse thermal load and forced air cooling heat sink.

Key words: flat plate heat pipe; integrated power electronic module (IPEM) thermal characteristic; thermal model

1 引言

电力电子集成技术的产生和发展正快速地促进电力电子集成模块朝着小型化、轻量化、智能化方向发展^[1]. 集成模块的小型化不仅能够减少耗材、减轻重量、增加功率密度和降低成本, 而且能够提高功率器件的封装密度, 减小由封装引起的寄生电感、电容和电阻参数, 从而提高集成模块的电气性能. 然而, 集成模块的小型化在增加模块功率密度的同时, 也增加了模块损耗功率密度, 导致集成模块内的发热功率管芯的热集中非常严重^[2]. 散热问题已成为制约集成模块朝着小型化方向发展的主要因素之一. 同时, 研究^[3]表明电力电子集成模块的失效有近 55% 是由于高温引起的. 因此, 综合优化模块传热性能, 并研究开发具有紧凑可靠、灵活高效和免维护的新型散热方式是电力电子集成技术中急需解

决的一个问题.

热管具有特别高的导热性能, 它的等温性和超导热性可以用来冷却高热流密度的发热源和调节传热路径的热流密度^[4,5]. 因此, 热管在解决集成模块中的热集中问题并降低电力电子芯片的结温方面具有非常明显的优势. 现阶段, 热管分为单管热管、热管阵列和平板热管三种^[6]. 文献[7]研究了微小型循环单管热管, 其传热极限功率达到 100W . 文献[8]介绍了基于硅的矩形凹巢平板式热管, 建立了热管的数学模型, 并将其应用到微电子封装中. 文献[9]对基于陶瓷基板的热管内部微观结构和功率器件的散热性能进行了实验研究. 目前, 国内学者在热管方面也有相关成果, 文献[10]对垂直传热平板热管进行了实验研究.

本文介绍了一种电力电子集成模块用新型垂直传热平板热管基板, 并对其传热特性进行了研究. 文中介

收稿日期: 2006-10-13; 修回日期: 2009-04-16

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50237030); 台达资助项目 (No. DRE02006001)

绍了热管的工作机理以及基于该热管基板的集成模块散热系统的结构和热路模型.通过热管基板模块的实验数据,详细分析了该热管对模块的稳态传热特性和动态传热特性的改进.

2 平板热管的工作机理

新型平板热管的结构和工作机理如图 1 所示,热管空腔呈空心圆环状,外直径 50mm,腔壁厚度为 1.5mm,铜柱直径为 6mm,其内壁面在高温炉中烧结铜粉末,形成毛细吸液芯结构.抽成真空的腔体内,注入负离子水,密封后形成热管.管芯的发热功率流经 A 区传递给工作液体,A 区周围的工作液吸收热量蒸发,蒸发后的气体到达冷凝端释放热量并冷凝成液体.积聚在冷凝端的液体借助铜粉末毛细力返回到 A 区.

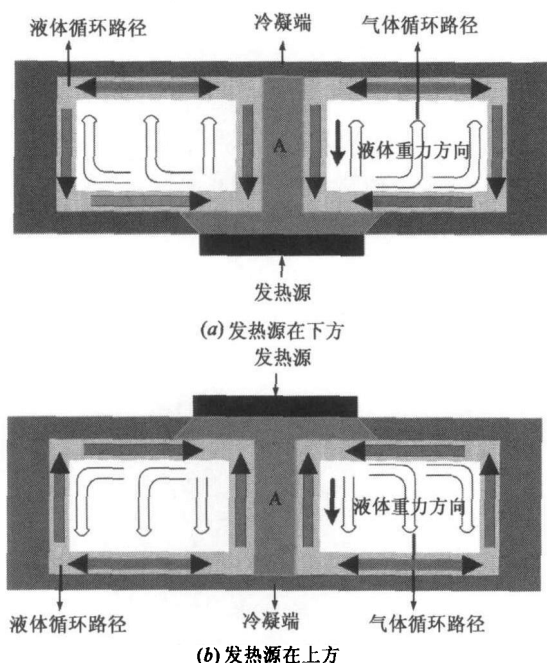


图1 平板热管的工作机理

在发热源位置增加的紫铜圆柱一方面是为了增加蒸发端的面积,提高热管的沸腾极限^[11].同时,缩短冷凝液体的回流路径长度并削弱液体重力的影响,提高了热管的毛细极限.另一方面,中心铜柱的加入可以提高铜壳的抗形变能力,增加热管的机械强度.

3 集成模块结构及热路模型

混合封装电力电子集成模块散热系统的三维剖面结构如图 2(a)所示.模块的最上层为功率半导体管芯——1200V/100A 快恢复二极管管芯和 1200V/100A IGBT 管芯,功率半导体管芯通过高温银锡焊料焊接在高热导率的双面覆铜的 Al₂O₃ 陶瓷基板上表面.铝丝键合实现管芯之间以及管芯与上表面覆铜层的电气互连

形成单管芯 IGBT 功能.完成铝丝键合的陶瓷基板通过铅锡焊料焊接在热管上,替换了传统集成模块中的铜基板,最后功率管芯以硅橡胶密封.

小面积尺寸的功率半导体管芯产生的损耗以热传导方式经管芯焊料,Al₂O₃ 陶瓷基板 DBC、DBC 焊料传递到热管蒸发端.在热管蒸发端表面经热管工质两相换热、扩散,传递给热管的冷凝端.最后,耗散功率经铝制散热器,在风扇的强制风冷下以对流方式传递给环境中的空气,热流路径如图 2(b)左所示(忽略热辐射效应).

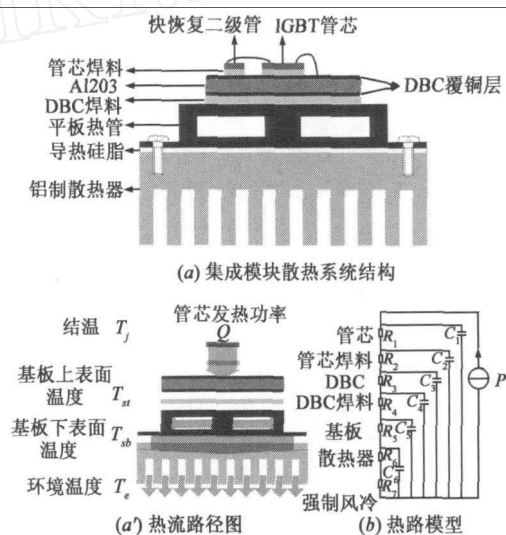


图2 集成模块散热系统结构和热路模型

对于无内生热的传导体,沿热流路径 x 方向的热学方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho c \partial T}{\lambda \partial t} \quad (1)$$

参照电路学中的传输线方程可得到集成模块散热系统的热路模型(忽略填充工质的储能),温度为各点温度相对环境温度的差值.如图 2(b)右所示, $R_1, C_1, R_2, C_2, R_3, C_3, R_4, C_4, R_5, C_5, R_6, C_6$ 分别为管芯、管芯焊料、DBC、DBC 焊料、基板、散热器的热阻和热容.

R 为导热物体热阻,其计算式为:

$$R = \frac{\overline{T}_{hot}^{static} - \overline{T}_{cold}^{static}}{Q} \quad (2)$$

其中, $\overline{T}_{hot}^{static}, \overline{T}_{cold}^{static}$ 为稳态时,热流流经导热物体的热端有效表面(占总功率的 90% 以上区域)平均温度和冷端有效表面平均温度.

C 为导热物体热容,表示相对于环境的单位温差导热物体存储的能量,其计算式为:

$$C = k\rho cV \quad (3)$$

其中, ρ 为导热体密度(kg/m^3), c 为导热体比热容($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), V 为导热体体积, k 为导热体温度场分布系数. k 的计算表达式如下:

$$k = \frac{\int_V T_V dV}{\overline{T}_{hot}^{static} V} \quad (4)$$

R_7 为无相变对流换热引起的等效热阻,根据对流换热表达式可得到对流换热的等效热阻计算式:

$$R_7 = \frac{1}{hA} \quad (5)$$

其中,平均对流换热系数 \bar{h} 由流体速度、流体物性和对流表面结构共同决定.

表 1 和表 2 列出了各个导热材料的传热参数和几何尺寸,其中 IGBT 管芯的有效发热面积为 $11 \times 11 \text{mm}^2$.

表 1 模块导热材料传热参数

材料	热导率(W/m·K)	质量密度(kg/m ³)	比热(J/kg·K)
IGBT 管芯	141	2330	700
管芯焊料	39	10902	139
DBC 覆铜层	385	8933	385
Al ₂ O ₃	25	3960	850
DBC 焊料	65	7320	230
平板热管铜材	385	8933	385
铝制散热器	238	2689	951

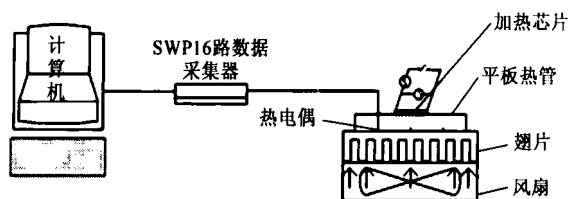
表 2 模块导热材料几何尺寸

材料	厚度(mm)	长度(mm)	宽度(mm)
IGBT 管芯	0.180	12.4	12.4
管芯焊料	0.1	12.4	12.4
DBC 覆铜层	0.2	30	29
Al ₂ O ₃	0.38	30	29
DBC 焊料	0.1	30	29
平板热管	9	外直径 50mm 的空心圆柱	
铝制散热器	30	70	70

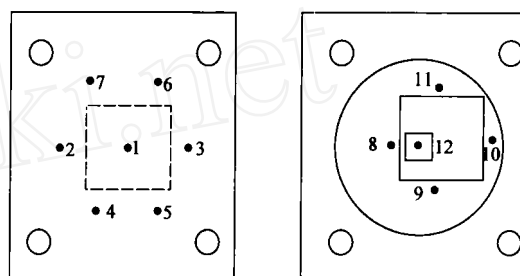
4 实验测试原理

实验测试系统由平板热管集成模块、铝制 CPU 散热器、风扇、风速控制电源、IGBT 恒流控制电路、功率测量仪、三相可调电压源、热电偶、精密水银温度计、温度采集器和计算机组成.测试装置原理如图 3(a)所示.铝制 CPU 散热器翅片间距为 1.6mm,平均风速为 3m/s.

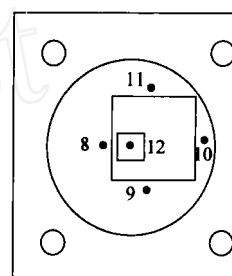
集成模块发热源采用管芯模拟发热技术,通过调节栅极电压控制管芯饱和电流,使其工作在线性区.集成模块 IGBT 的发射极电流为 6.2A.功率测量仪为 TEK TDS3052B 示波器,实时检测 IGBT 集电极到发射极之间的电压,以及精密检流电阻上的电压,用以测量 IGBT 管芯的发热功率.集成模块中 K 型镍铬-镍硅热电偶分布如图 3(b)和(c)所示.其它两根热电偶实时测量风扇进风口温度,精密水银温度计测量环境温度.



(a) 传热性能实验原理



(b) 下底面热电偶分布



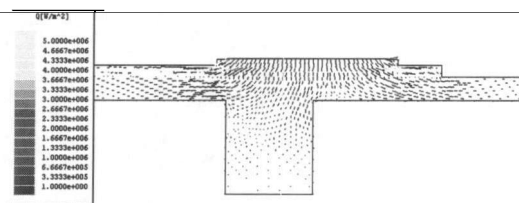
(c) 上表面热电偶分布

图 3 传热性能实验原理和热电偶布置

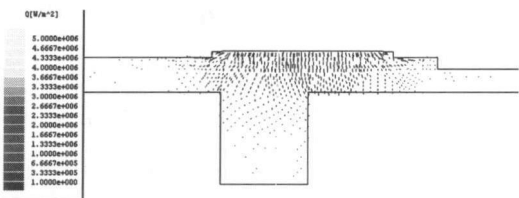
5 集成模块的稳态仿真

在简化的传热仿真模型中,将热管的蒸发端和冷凝端分离,在蒸发端施加等效的对流换热系数.图 4(a)和(b)所示为不同对流换热系数下模块中心截面上的热流密度矢量分布.

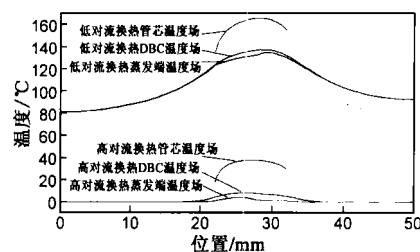
当对流换热系数在 $10^3 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,热流分布于整个下表面.在管芯表面垂直覆盖以外的区域,热流密度矢量沿水平方向的分量值大,沿竖直方向的分量值小.



(a) 1000 W/(K·m²) 时的热流密度矢量分布



(b) 1000000 W/(K·m²) 时的热流密度矢量分布



(c) 两种对流换热系数下的各线层温度分布

图 4 不同对流换热稀疏下模块温度分布情况

当对流换热系数增加到 $10^6 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 热流仅分布在发热源所在区域. 热流矢量沿着管芯表面区域向下传递, 而且与蒸发端壁面垂直. 管芯表面区域以外的铜层热流密度非常小, 且该区域的温差值为零. 图 4(c) 所示在两种对流换热系数下, 管芯表面和 DBC 下表面沿中线的温度分布情况. 数据显示, 在低对流换热系数下, 管芯上表面和 DBC 下表面的温度梯度大. 而在高对流换热系数下, 管芯上表面和 DBC 下表面温度梯度明显减小, 且存在区域也缩小. 这是管芯表面发热源热流密度矢量越来越垂直于管芯表面, 并且更加均匀的向下传递的原因所致. 根据叠加定理在高对流换热系数下两个相邻管芯同时发热时, 其热流矢量垂直下方传递, 因此, 两管芯之间的热影响小.

6 集成模块的稳态传热实验结果

6.1 热管集成模块的稳态传热特性

各层温度随管芯发热功率变化曲线如图 5(a) 所示, 其温度为实际温度与环境温度的差值. 实验结果表明热管下表面的平均温度随管芯发热功率正比例增加. 然而, 热管上表面平均温度和管芯上表面温度均与管芯发热功率成分段线性关系. 在 $4 \sim 50 \text{W}$ 时, 其温度随发热功率线性变化, 且变化率大; 而在 $50 \sim 225 \text{W}$ 时, 温度随发热功率的变化率小, 尤其是热管上下两端面的温差保持恒定. 此外, 当热管发热源在上方时, 各层

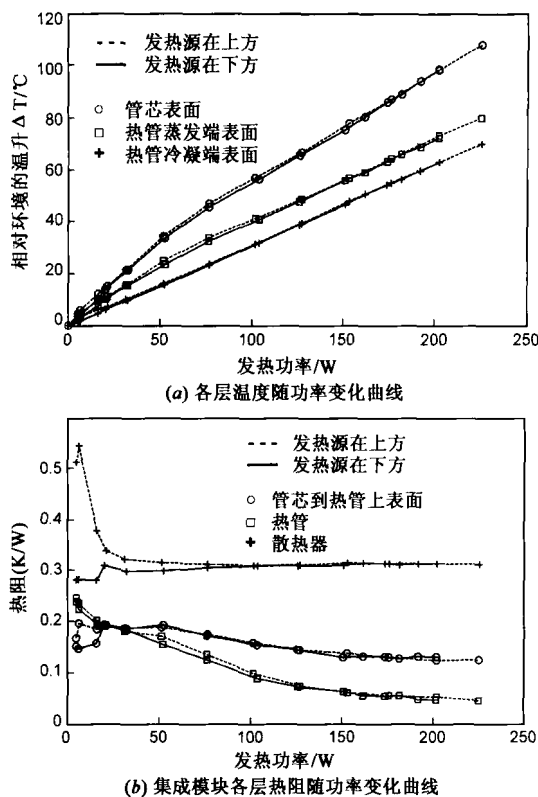


图5 热管集成模块的稳态传热特性

的温度比在下方时的温度高 1°C . 当发热功率超过 100W 时, 两种放置方式下的测量温度值一致, 热管蒸发端和冷凝端的温差保持 9.5°C 不变.

根据式(2)可计算出各层的热阻随发热功率变化关系, 如图 5(b) 所示. 散热器的热阻保持 $0.310 \text{K}/\text{W}$ 不变. 随着管芯发热功率的增加, 集成模块内的各层热阻均减小. 忽略发热源上下放置的微小差异, 可得到热管集成模块各层热阻计算式:

(a) 热管基板热阻

$$R_{\text{sub}} = \begin{cases} R_{\text{heatpipe}}, & 0 \leq Q \leq 60 \text{W} \\ \frac{T_{\text{heatpipe}}}{Q}, & 60 \text{W} \leq Q \leq Q_{\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

此处, R_{heatpipe} 值为 $0.16 \text{K}/\text{W}$, T_{heatpipe} 为 9.5°C .

(b) 管芯、DBC 和焊料热阻

$$R_i = \begin{cases} R_i^1, & 0 \leq Q \leq 60 \text{W} \\ R_i^2 + \frac{T_i}{Q}, & 60 \text{W} \leq Q \leq Q_{\text{max}} \end{cases} \quad (7)$$

此处, R_i^1 值为 $0.188 \text{K}/\text{W}$, R_i^2 值为 $0.097 \text{K}/\text{W}$, T_i 为 5.8°C .

6.2 四种基板集成模块稳态传热特性对比

本文将热管基板模块与相同结构尺寸的空气填充热管基板模块、相同结构的 9mm 厚纯铜基板模块和 3mm 厚纯铜基板模块进行了稳态传热对比实验.

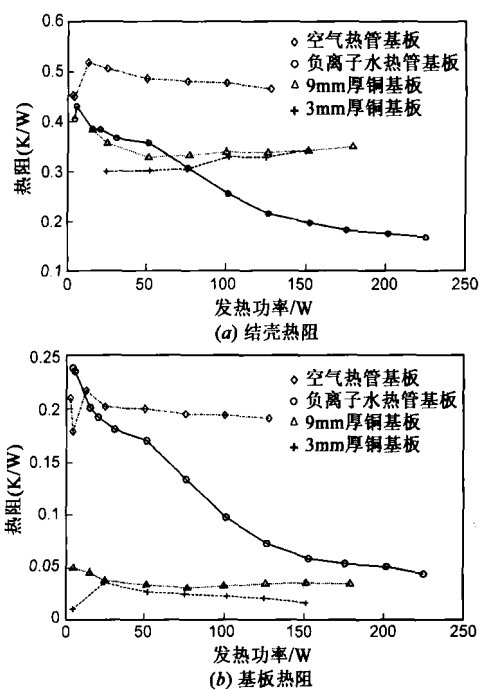


图6 四种基板模块的稳态传热特性对比

图 6(a) 数据表明, 3mm 厚纯铜基板商用模块热阻为 $0.33 \text{K}/\text{W}$, 9mm 厚的纯铜基板模块的结壳热阻与之相近为 $0.34 \text{K}/\text{W}$. 空气热管基板的结壳热阻最大, 为 $0.48 \text{K}/\text{W}$. 负离子水热管基板模块的结壳热阻在很低的

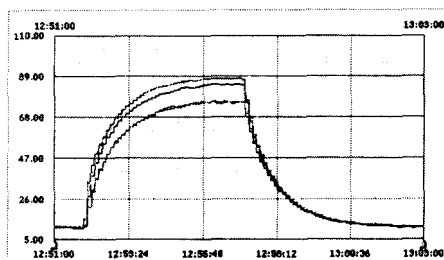
发热功率时,其结壳热阻与空气热管基板相同.但是,当发热功率大于 75W 时,其值低于 3mm 纯铜基板模块的结壳热阻.当发热功率达到 225W 时,结壳热阻阻值减小到商用模块的 50%,其值为 0.17K/W.

图 6(b)数据表明,空气热管基板的热阻最大,达到 0.2K/W.而商用模块的 3mm 厚铜基板热阻最小,值为 0.022K/W.9mm 厚的铜基板热阻为 0.035K/W.负离子水热管基板在低热流密度下的基板热阻与空气热管基板的热阻相同,但是随着热流密度的提高,基板热阻迅速减小;当热流密度达到 $186\text{W}/\text{cm}^2$ 时,基板热阻减小到 0.044K/W.

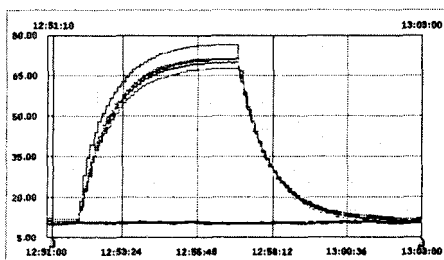
7 集成模块的瞬态传热实验结果

7.1 热管瞬态实验结果

图 7 所示为集成模块加卸载时,各个测温点的瞬时温度变化曲线.当功率管芯突加 200W 发热功率时,各个测温点的温度成负指数规律上升;当切除发热功率后,各个测温点的温度成负指数规律衰减到环境温度.



(a) 上表面测温点温度



(b) 下表面测温点及环境温度

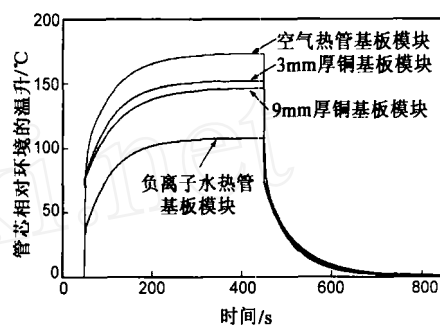
图7 200W加卸载时集成模块瞬态温度曲线

7.2 四种基板集成模块瞬态传热特性对比

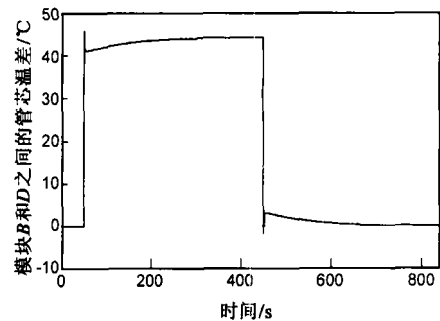
图 8 所示为四种不同基板模块在幅值 225W 周期为 400 秒的方波功率激励下的仿真波形,其中模块的热路模型参数根据实验结果提取,且均采用相同的铝制散热器,简化的热路模型参数见表 3.仿真波形表明,空气热管基板模块的管芯温度最高.由于在高热流密度下负离子水热管集成模块的管芯、DBC 和焊料层呈现低热阻特性,所以,瞬态温度比两种厚度尺寸的铜基板模块低,如图 8(b)所示.与 3mm 厚商用铜基板模块相比,负离子水热管基板模块管芯瞬态温度低 46°C .

表 3 热管基板模块的热路模型参数

$R_{1-4}(\text{K}/\text{W})$	热管基板		铝制散热器	
	$R_5(\text{K}/\text{W})$	$C_5(\text{J}/\text{K})$	$R_6 + R_7(\text{K}/\text{W})$	$C_6(\text{J}/\text{K})$
$R_1(Q)$	$R_{sub}(Q)$	20	0.310	175



(a) 瞬态波形



(b) 瞬态温差

图8 不同基板模块的管芯瞬态温度对比

8 结论

本文对基于垂直导热新型平板热管基板的电力电子集成模块的传热特性进行了研究,用以替代传统的铜基板模块.文中详细介绍了热管散热装置的结构、工作机理和实验测试系统.仿真结果表明,随着热流密度的增加,热管蒸发端表面的等效对流换热系数增大,热流密度矢量在 DBC、焊料和蒸发端铜层中更倾向于垂直传输,削弱了模块热集中现象.文中根据实验数据,提取出随功率变化的各层热阻表达式以及热路模型参数.

实验结果验证了以下结论:

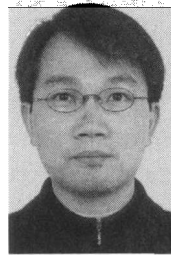
(1)新型平板热管蒸发端在高热流密度下的高对流换热能力,提高了集成模块热流密度在蒸发端的垂直传输能力,削弱了模块的热集中现象,与 3mm 的商用铜基板模块相比,模块结壳热阻降低 50%;(2)新型平板热管集成模块在高热流密度下呈现的低结壳热阻特性,提高了功率管芯抗冲击功率的能力.与 3mm 厚商用铜基板模块相比,在 225W 脉冲功率下其管芯瞬态温度低 46°C ;(3)新型平板热管在正反放置下具有相同的传热性能.

参考文献:

[1] Lee F C van Wyk, J D Boroyevich D Guo-Quan Lu. Zhenxian

- Liang, Barbosa P. Technology trends toward a system-in-a-module in power electronics [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine. 2002, 2(4): 4 - 22.
- [2] 余小玲. 电力电子集成模块及新型翅柱复合型散热器的传热性能研究 [D]. 西安: 西安交通大学博士学位论文, 2005.
Yu Xiao-ling. Heat Transfer in Integrated Power Electronic Modules and in New Type of Plate-pin Fin Heat Sink [D]. Xi'an: Dissertation for Doctoral Degree, Xi'an JiaoTong University, 2005. (in Chinese)
- [3] Yun C. S. Static and Dynamic Thermal Behavior of IGBT Power modules [D]. Lausanne: Dissertation for Doctoral Degree, Swiss Federal Institute of Technology, 2000. (in Swiss)
- [4] Luc Meysenc, M. Jylhäkallio, Peter Barbosa. Power Electronics Cooling Effectiveness versus Thermal Inertia [J]. IEEE Transactions on Power Electronics. 2005, 20(3): 687 - 693.
- [5] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社. 1998. 376 - 377.
Yang Shi-ming, Tao Wen-quan. Heat Transfer (Third Edition) [M]. Beijing: High Education Press. 1998. 376 - 377. (in Chinese)
- [6] 范春利, 曲伟, 孙丰瑞, 杨立, 马同泽. 微小型热管的研究现状与进展[J]. 电子器件, 2004, 27(1): 211 - 216
Fan Chunli, Qu Wei, Sun Feng-rui ri, Yang Li, Ma Tong-ze. Status and Recent Progress of Research on Micro/Miniature Heat Pipes [J]. Chinese Journal of Electron Devices. 2004, 27(1): 211 - 216. (in Chinese)
- [7] Yury F. Maydanik, Sergey V. Vershinin, Mikhail A. Korukov, Jay M. Ochterbeck. Miniature loop heat pipes—A promising means for cooling electronics [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2005, 28(2): 290 - 296.
- [8] Charlotte Gillot, Yvan Avenas, Nathalie Cezac, Gilles Poupon, Christian Schaeffer, Elise Fournier. Silicon Heat Pipes Used as Thermal Spreaders [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2003, 26(2): 332 - 339.
- [9] Jones K. W. Liu, Y. Gao, M. Micro heat pipes in low temperature cofire ceramic (LTCC) substrates [J]. IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies. 2003, 26(1): 110 - 115.
- [10] Hang 1. i-chum, MA Tony-zee, GE Xin-shi. Theoretical and experimental investigation on flow and heat transfer in a flat miniature heat pipe with axial grooves [J]. Journal of University of Science and Technology of China. 2003, 33(4): 450 - 459.
- [11] 庄骏, 张红. 热管技术及其工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社. 2000. 118 - 122.
Zhuang Jun, Zhang Hong. Heat Pipe Technology and Engineering Application [M]. Bei Jing: Chemical Industry Press. 2000. 118 - 122. (in Chinese)

作者简介:



张良华 男, 1980年9月出生于湖北松滋. 2002年获西安交通大学电气工程及其自动化专业学士学位, 2005年获西安交通大学控制理论及控制工程专业硕士学位. 现为西安交通大学电力电子与电力拖动专业博士研究生, IEEE会员, 研究方向为电力电子集成技术、电子封装技术、新型电路拓扑、开关电源和变频调速系统.
E-mail: lilienthal_zhang@163.com

余小玲 女, 1978年生于湖北潜江. 博士, 西安交通大学能动学院讲师. 2000年获西安交通大学流体机械专业学士学位. 2005年获西安交通大学动力工程与工程热物理专业博士学位. 同年进入西安交通大学能源与动力工程学院工作至今. 研究方向为电力电子器件冷却技术.