

新型径向平板热管传热性能的实验研究

张亚平^{1,2}, 余小玲¹, 周恩民¹, 冯全科¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安科技大学能源学院, 710054, 西安)

摘要: 提出了一种能够代替金属基板,并能与大功率模块一体化设计的新型径向平板热管结构. 相对于金属基板,该热管基板的优势在于利用两相沸腾换热对功率模块内的集中热源进行扩散,因此其热扩散能力大大高于以导热热扩散的金属基板,从而能够提高模块的功率密度. 对径向平板热管进行了稳态和瞬态传热性能实验,并与铜基板的实验结果进行了对比. 结果表明:与铜基板相比,径向平板热管具有更高的热扩散能力,可降低模块的结壳热阻;热管冷凝面具有良好的等温性,当芯片功率密度为 176 W/cm^2 时,热管冷凝面的温差在 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内;热管模块启动过程中芯片达到相同温度需要的时间长,有利于克服功率“飙升”和提高功率器件抗热冲击的性能.

关键词: 平板热管;传热;基板

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0780-04

Experimental Research on Heat Transfer Performance of Novel Radial Flat Heat Pipe

Zhang Yaping^{1,2}, Yu Xiaoling¹, Zhou Enmin¹, Feng Quanke¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: A novel radial flat heat pipe(RFHP) integrated with high power module instead of metal substrate was developed. Compared with metal substrate, the RFHP uses two-phase boiling heat transfer to diffuse heat in power module, and thus improve the thermal performance of the power module. The transient and steady heat transfer performance of the RFHP was experimentally measured and compared with that of copper substrate. Experiment result indicates that the RFHP has greater thermal diffusivity, and can reduce junction-to-case thermal resistance of the module. When power density is 176 W/cm^2 , the temperature difference on the condensation section is within $3 \text{ }^\circ\text{C}$. The longer time period for the chip to reach the same temperature during RFHP module start-up can avoid power uprush and raise the ability of resisting thermal impact.

Keywords: radial flat heat pipe(RFHP); heat transfer; substrate

目前,功率模块采用的热扩散基板大多为实体金属基板,存在耗材量大、功率密度小、与电子元件集成难度大等缺点,而平板热管(简称热板)能有效解决散热和减小温度梯度.热板通过降低热阻而达到高热导率,保证热量快速及时传递,同时减小了模块的尺寸和质量^[1].用热管基板代替金属基板能大大强化基板的热扩散,热板的等温性也有益于降低

热阻,为与电子元件一体化封装提供了条件.

国内外学者对热板的性能及结构进行了大量的研究:文献[2]根据斜窄空间内沸腾原理设计出一种平板热管;文献[3]提出了一种整体矩形状平板,其内部结构由许多并列的小矩形长条单元组成;文献[4]研究了3种轴向槽道小型平板铜水热管;文献[5]报道了一种带有沟槽的平板热管.但是,至今

还没有建立起热板设计的工作参数,缺少可靠的计算与设计方法,与功率模块一体化的热板热性能研究也甚少.

基于以上原因,在前人研究的基础上,本文提出了与大功率模块一体化设计的新型径向平板热管结构,并进行了瞬态和稳态的传热实验,为金属基板的替代做了铺垫,对开发径向平板热管产品及研究电力电子集成模块散热具有参考价值.

1 结构设计

对混合封装电力电子集成模块优化模拟时发现^[6]:当基板底面等温时,模块的结壳热阻最小,并且芯片之间完全没有热影响.在此设计准则指导下,设计开发了一种用于电力电子集成模块散热用的小型径向平板热管,提出了这样的构思:将铜基板中心部分做成空腔,空腔内抽真空,注入一定容量的工质,以径向平板热管代替铜基板;用铜柱连接在蒸发面和冷凝面间,圆铜柱能增加热管轴向回流路径,缩短冷凝液体回流路径,削弱液体重力的影响^[7],同时能增强基板的金属强度.该设计结构的优点在于基板底面能够保持良好的等温性,质量轻且增加了冷却面积,具有更好的导热性.

所设计的热板结构如图1所示:热管空腔成空心圆环状,壳体材料为紫铜;工质为负离子水,充液量1.5 ml;热管工作的温度是-5~120℃,吸液芯为200目紫铜粉末烧结的1 mm厚毛细多孔层.

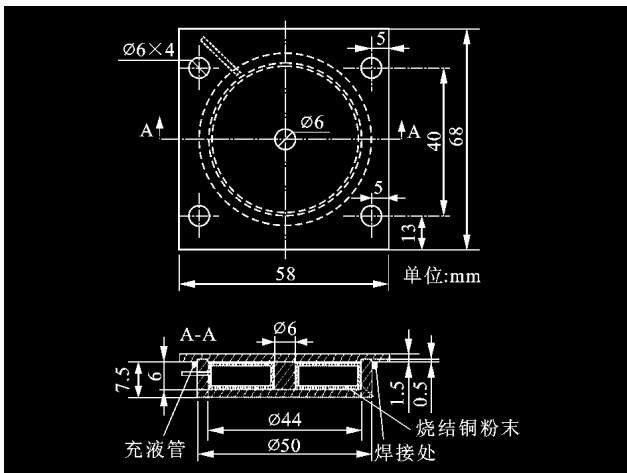


图1 热板结构尺寸图

2 实验装置

实验装置主要由加热芯片、稳流电路、热板、CPU散热器(翅片和风扇)、热电偶、数据采集系统、PC机组成(见图2).热板表面中心处焊一枚IGBT

芯片,代表发热源,加热功率为0~225 W.采用将CPU散热风扇直接放置在肋片上端进行强制对流换热的冷却方式.与热源同侧的裸露热板表面,主要通过空气自然对流换热.用精密水银温度计测量环境温度,精度为±0.1℃.在热板蒸发端和冷凝端分别均匀布置5根和7根K型镍铬-镍硅热电偶测量温度(见图3),精度为±1%.

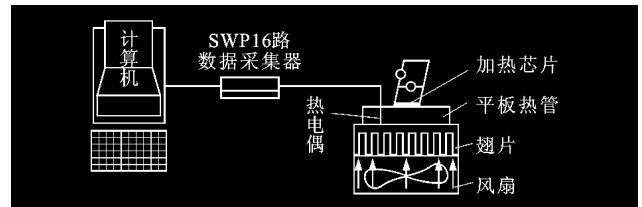
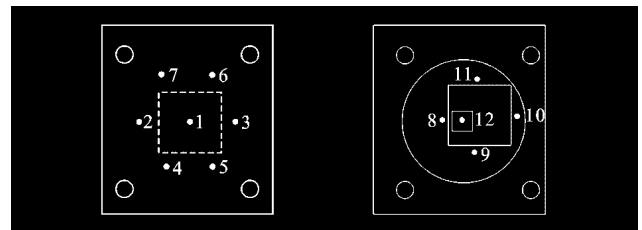


图2 实验装置示意图



1~7:测点 (a)冷凝端
8~12:测点 (b)蒸发端

图3 热电偶位置布置图

3 实验数据分析

3.1 冷凝端温度分布及等温特性

从图4可以看出,随加热功率P增加,热板冷凝端表面温度逐渐增高,当芯片功率密度为176 W/cm²时,热管冷凝面温差在3℃以内,说明热源的热量可以较均匀地传导至热板上.这主要是因为热板能够在径向上进行传质换热,使得热源和散热器接触部分的温度与散热器底部平均温度的梯度大大减小,充分体现了热板的均温特性,模块内芯片之间具有相互热影响减小的优势.热板的这个特点还可用于移走一系列加热器产生的热点或设计成一个有效的

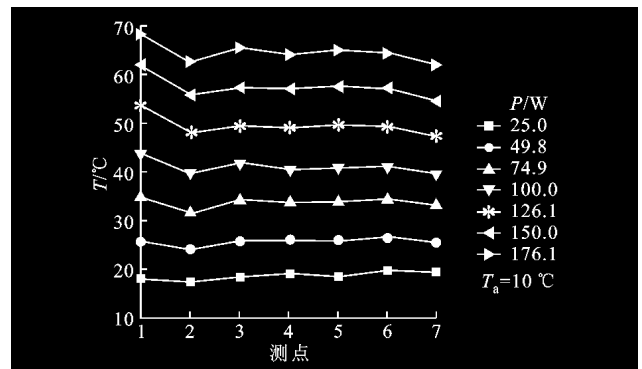


图4 热板冷凝端温度分布

辐射器.从图4还可看出,测点1的温度偏高,主要是因为一部分热流流经铜柱时引起中心温度偏高所致.

3.2 3种基板的结壳热阻对比

对电力电子集成模块而言,模块的结壳热阻最能反映其热特性,根据稳态时结壳热阻的大小可以预测模块芯片的结点温度,确保其不超过额定温度.模块的结壳热阻为4部分热阻之和,即芯片热阻、焊料热阻、敷铜陶瓷板(DBC)热阻、基板热阻.其中:DBC热阻占结壳热阻的44%;芯片热阻与铜基板热阻之和占结壳热阻的52%;焊料热阻只占结壳热阻的4%^[8].一定规格的芯片热阻不能改变,因此降低结壳热阻只能从降低DBC热阻和基板热阻两方面考虑.

从图5可以看出:负离子水热管基板能有效减小芯片、DBC及焊料热阻,在高效点运行时结壳热阻降至0.177 K/W,比纯铜基板模块热阻小0.05 K/W,并远小于空气填充的热管基板模块热阻.这是由于热板蒸发端的高对流换热系数增大了芯片、DBC和焊料层的热扩散能力,使模块芯片处集中热流密度更加均匀地向更大面积的DBC和焊料层扩散,从而削弱了热集中现象,导致热阻减小.同时,热管内的负离子水沸腾时实现两相传热,使热管腔体内等温性更好,从而提高了芯片、DBC及焊料层的散热效率.

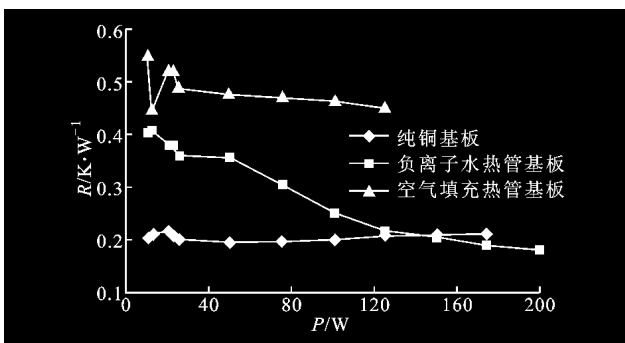


图5 结壳热阻对比

热管基板模块在高热流密度冲击时,结壳热阻减小,芯片的瞬态温升小于固定热阻的纯铜基板和空气热管基板模块,因此热管基板可提高集成模块抗热冲击的能力.

3.3 瞬态升温降温曲线

3.3.1 相同测温点,不同加热功率 由图6可以看出,随着加热功率增加,热板温度达到稳态的时间也增加,在散热不变的情况下,热板的表面温度相应有所增加.

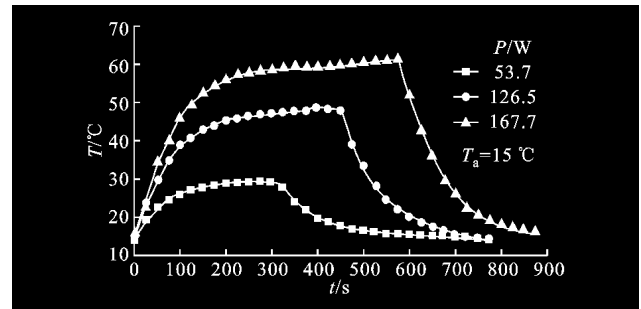


图6 测点1的升温及降温变化曲线

3.3.2 相同加热功率,不同测温点 由图7可以看出,加热开始,靠近加热中心测点8的升温很快,测点1和测点4的升温相对缓慢一些.随着加热继续,测点8与测点1和测点4的温差逐渐拉大,但测点1和测点4之间的温差并不大,这说明热板冷凝端具有较好的等温性.3条曲线均在加热250 s以后升温变缓,在350 s以后温度几乎同步达到稳定状态,具有非常好的一致性,体现了热板较好的均匀起动特性.

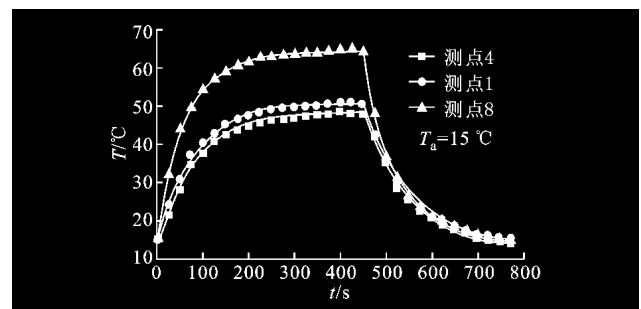


图7 不同测点的升温及降温变化曲线

3.4 热板与铜基板瞬态特性比较

由图8可以看出:升温100 s以后热板上测点1的温度明显低于铜基板温度,热板散热能力强的优势开始显现,这主要是由于热板利用两相沸腾换热来对功率模块内的集中热源进行扩散,其热扩散能

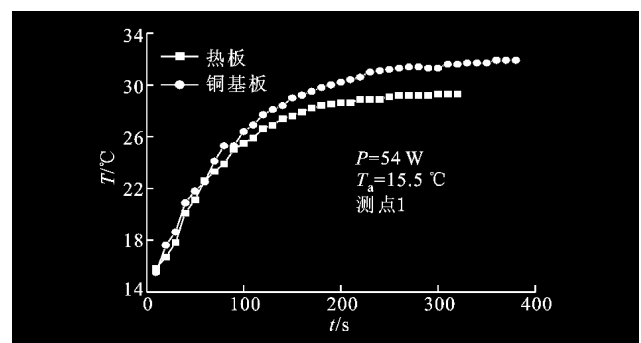


图8 热板与铜基板瞬态特性比较

力大大高于以导热进行热扩散的金属基板,并有利于消除芯片中出现的热点,提高模块的热性能,从而证明了热板用于电力电子集成模块冷却比金属基板

有更大的优势.同时,由于热板模块启动过程中芯片达到相同温度需要的时间长,热板在处理电子设备启动过程中热流量大,有利于克服功率“飞升”。

3.5 热板在不同位置的传热性能

本实验中热板的位置分2种(见图9),热阻由下式计算

$$R_1 = (\bar{T}_e - \bar{T}_c) / Q \quad (1)$$

$$R_2 = (T_{12} - T_a) / Q \quad (2)$$

式中: \bar{T}_e 为热板蒸发端的平均温度; \bar{T}_c 为冷凝端的平均温度; T_{12} 为芯片最高温度.由图10可以看

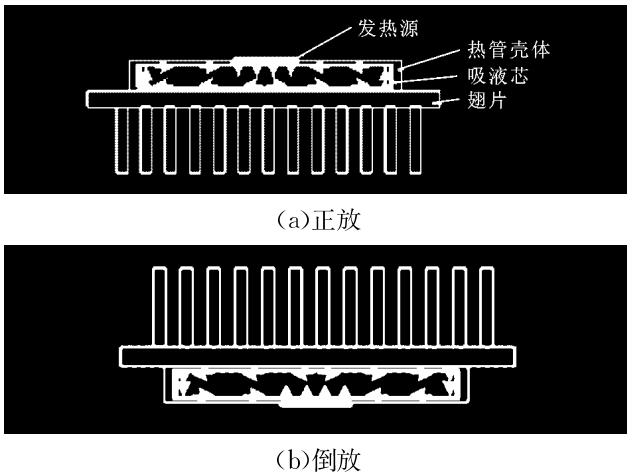


图9 热板位置图

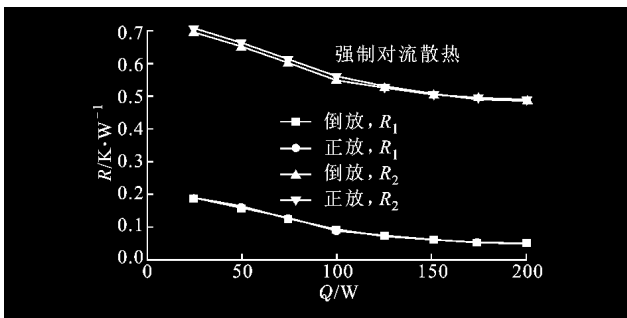


图10 热板正放和倒放时热阻随加热功率的变化曲线

出: R_1 和 R_2 均随加热功率的增加而下降,且具有相似的变化趋势,这是由于输入功率的增加使热板热流密度增加,壁面汽化核心增加,气泡产生的频率加快,使蒸发端汽化加剧,气泡扰动增强,因而传热系数增加,热阻减小.在加热功率为200W时热板的热阻尚未产生突跳,这就意味着热板还没有达到其传热极限.当热板正放、加热面在上时,回流不如倒放容易,但由于毛细力较大,工质回流充分.总体来说,放置的角度对于该热板的传热性能影响比较小。

4 结 论

(1)热板促使基板等温性增强,提高了模块热扩散能力,能有效减小模块结壳热阻,使热管腔体等温性更好,模块内芯片之间的相互热影响减小,提高了集成模块抗热冲击的性能。

(2)热板能使芯片出现热点处的热流密度降低,从而可以与传统的散热器结合,能大大强化换热,降低芯片的最高温度,有利于消除芯片中出现的热点。

(3)热板启动过程中芯片达到相同温度需要的时间长,有利于克服功率“飙升”。

(4)热板在正放和倒放时均能正常工作,且具有比铜基板更好的等温性、瞬态特性和散热效果。

参考文献:

- [1] 岂兴明. 小型平板热管的研究[D]. 长春: 吉林大学机械工程学院, 2004.
- [2] Cao Yang, Gao Ming. High heat flux network heat pipes employing boiling mechanisms in a narrow space [M]. Atlanta, GA: McGraw-Hill, 1997: 23-25.
- [3] 程德威, 胡幼明, 王惠龄. 新型平板热管流动与传热特性的理论分析[J]. 低温工程, 1998, 6(2): 42-48. Cheng Dewei, Hu Youming, Wang Huiling. Analysis of flow and heat transfer characteristics of a new flat plate heat pipe [J]. Cryogenics Engineering, 1998, 6(2): 42-48.
- [4] Hopkins R, Faghri A, Krustalev D. Flat miniature heat pipes with micro capillary grooves [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1999, 121(1): 102-109.
- [5] Dunn A, Yitner A. Analyses of flat heat pipe with capillary grooves [C] // International Heat Pipe and Transfer Conference. Seoul: Boca Raton, 1994: 87-93.
- [6] 余小玲, 曾翔君, 杨旭, 等. 混合封装电力电子集成模块内的传热研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(3): 258-261. Yu Xiaoling, Zeng Xiangjun, Yang Xu, et al. Heat transfer in a hybrid integrated power electronic module [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(3): 258-261.
- [7] 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.
- [8] 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: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2005.

(编辑 王焕雪)