

LED灯的液态金属冷却方法试验研究^{* *}

马璐, 刘静^{* *}, 马坤全, 周一欣

(中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

摘要:提出LED灯的液体金属散热新方法,并研制出基于电磁泵(EP)驱动的散热系统原型。实验结果表明:在LED灯的输入功率达到25.7 W时,液态金属散热系统可将其基座温度维持在33.1 °C,从而确保LED芯片安全运行。评估了EP输入功率、肋片及风扇对液态金属散热系统散热效果的影响。

关键词:LED灯; 液态金属; 电磁泵(EP); 散热

中图分类号: TN312+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2009)09-1150-04

Experimental study on liquid metal cooling for LED light

MA Lu, LIU Jing^{* *}, MA Kun-quan, ZHOU Yi-xin

(Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A novel liquid metal cooling method for LED light is proposed. A prototype system driven by an electromagnetic pump is developed. According to the experiments, when the input power of LED light reaches 25.7 W, the liquid metal cooling system still maintains its base temperature at 33.1 °C, which ensures the safe running of the LED chip. The impact of the input power of the electromagnetic pump and the surface size of the fin and fan on the heat dissipation performances of the system is further evaluated.

Key words: LED light; liquid metal; electromagnetic pump(EP); cooling

1 引言

LED灯是一种冷光源,其机理在于依靠电子在能带间跃迁产生光,光谱中不含红外成分,因而所产生热量不能通过辐射发出。目前LED灯的发光效率仅能达到10~20%,其80~90%的能量转化为热能。随着LED功率密度的提高,会使得芯片内PN结结温升高,进而对LED芯片的性能产生严重影响,加速器件老化,甚至引起芯片烧毁^[1]。针对LED的热管理,已有大量研究。Christensen等人^[2]用有限元方法分析了系统温度分布,考察了高功率LED封装的热问题,并指出,在自然对流下,为保证LED能够安全工作,其功率不能超过1 W;对于高密度高功率LED,必须考虑空气强迫对流、热管等主动散热方案。Kim等^[3]研究了高功率LED芯片粘节点的瞬态温度特性,分析了粘结层的失效性和热阻问题。Kovac等^[4]阐述了基于有机和无机半导体材料制造LED的两个主要方向,并指出,未来的LED将朝着颜色更丰富、亮度更高和功耗更低方向发展。余彬海^[5]分析了PN结温对LED的光通量、波长、色度和寿命的影响。李炳乾^[6]采用金属线路板和板上芯片技术,在金属线路板上直接制作反光杯,以期减小系统热阻。苏达等人^[7]从封装结构和材料对高功率LED芯片的散热进展进行了

评述。吕家东^[8]对LED芯片的微流道制冷技术进行了研究指出,其散热效果可以高出Cu散热器的20倍。马泽涛等^[9]通过三维有限元分析法对LED结构进行简化处理,着重分析了器件级内部热阻及LED芯片发光时的温度场分布。费翔等^[10]基于正向电压法原理自行研制了结温测量系统,并指出,结温是影响LED光效的直接因素。

本文首次引入液体金属工质来实现LED灯的高效散热,整个系统采用封闭形式,借助无运动部件的电磁泵驱动液态金属的循环,将热量从LED灯基座带入冷却系统,从而实现有效地散热。

2 液态金属冷却系统原理

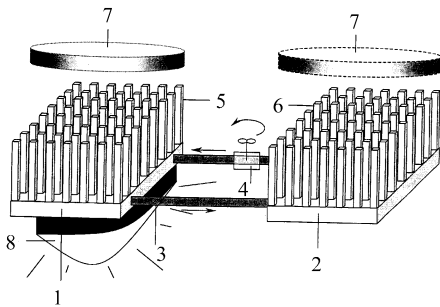
液态金属芯片散热方法于2002年首次提出^[11],其最初主要用于计算机芯片^[12]。Ma等^[13]近期研制出基于芯片自身发热量来驱动液态金属循环的器件。

图1显示了液态金属冷却系统工作原理,其中主散热器1的一表面与待冷却LED灯基底相接触,另一表面上则设置有散热肋片。主散热器内部开有流道。副散热器2用于将来自主散热器中液体金属工质带来的热量散走,其外表面分布有散热片。电磁泵(EP)4提供用以驱动液态金属工质循环的动力。

* 收稿日期:2008-12-11 修订日期:2009-04-24

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50576103)

* * E-mail: jliu@mail. ipc. ac. cn



1. Main cooler; 2. Auxiliary cooler;
3. Connecting tube; 4. EP;
5, 6. Fin; 7. Fan; 8. LED; light

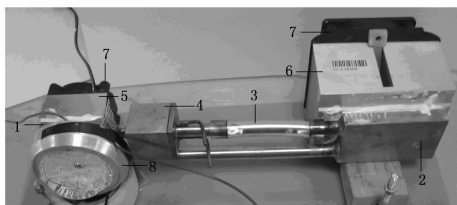
图1 液体金属散热系统实验原理

Fig. 1 Experimental principle for liquid metal based heat dissipation system

3 LED 散热实验系统原型

系统采用的液态金属系 Ga-In-Sn 合金。将 LED 灯 8 贴附于由高导热材料 Cu 制成的主散热器上,并用导热胶填充 LED 灯和主散热器间的缝隙,以减低接触热阻。微型泵 4 采用的是小功率 EP。EP 通电运行后,液态金属在电场力作用下,在流道里循环流动。LED 灯产生的高热流随即被带走,致使温度急剧下降,而液态金属温度得以提升,升温后的液态金属再经过副散热器 2 时,在肋片 6 和风扇 7 的作用下,与环境发生热交换,之后温度下降,再重新回到泵 4 中开始新的循环。

图 2 为基于图 1 研制出的散热试验系统实物图。为方便实验,将整个系统侧放。LED 灯的热流主要通过基座排出,基底温度大小可以反映散热效果,实验采用热电偶直接测量 LED 基底的温度。所用的 LED 白光灯由 27 个 LED 点阵组成,其额定功率为 30 W(10 V, 3 A),通过调节输入电压的大小改变输入功率。EP 通过控制输入电压来调节流量,实验中,为对比不同流量下的散热效果,输入了两组电压电流,分别是 $U=0.1$ V、 $I \approx 5.99$ A 和 $U=0.3$ V、 $I \approx 10.00$ A。



1. Main cooler; 2. Auxiliary cooler;
3. Connecting tube; 4. Electromagnetic pump;
5, 6. Fin; 7. Fan; 8. LED light

图2 液体金属散热系统实物

Fig. 2 Prototype of liquid metal cooling system

4 结果及讨论

图 3 给出的是不同散热方案的试验结果对比,其中 EP 的输入参数为 $U=0.1$ V、 $I=5.99$ A。针对 LED 灯则进行了多组

输入功率情况测试,相应参数分别为: $U=8.7$ V、 $I=1.03$ A(不采取主动冷却措施); $U=8.7$ V、 $I=1.03$ A(由液态金属散热装置实施主动散热); $U=9.0$ V、 $I=1.48$ A(由液态金属散热装置主动散热); $U=9.4$ V、 $I=2.07$ A(由液态金属散热装置主动散热); $U=9.8$ V、 $I=2.62$ A(由液态金属散热装置主动散热)。从图 3 可以很清晰地看出,仅采用自然对流冷却时,LED 灯依靠自身所带的 Cu 基底进行散热,其基底温度上升很快,在 $U=8.7$ V、 $I=1.03$ A 的输入功率下,在短短的 20 min 温度即从 21.7 °C 升至 72.1 °C,且几乎呈直线上升趋势(考虑到安全因素,没有继续观察升温持续情况)。显然,此种情形下,若不采取主动散热措施,温度还会继续上升,直至使 LED 灯失效。与此不同的是,当液态金属冷却系统开始工作时,同样在 $U=8.7$ V、 $I=1.03$ A 的输入功率下,LED 灯的基座温度仅从 21.7 °C 升至 23.43 °C,且约在第 8 min 时开始趋于稳定。这一比较表明,液态金属散热系统能够有效地降低 LED 灯的基座温度,并确保其安全稳定运行。图 3 还表明:采用液态金属散热方案,即使 LED 灯的输入参数增加至 $U=9.8$ V、 $I=2.62$ A 下,其基座温度仍能在 20 min 之内从 21.7 °C 升至 33.05 °C。这一结果表明,采用液态金属散热方案,LED 灯可以在较高电流电压(即高功率)下安全工作。在较低温度下工作时,LED 灯能够保证其光输出效率和光质量不会受到温度的大幅上升而降低,寿命也因此能得以延长。

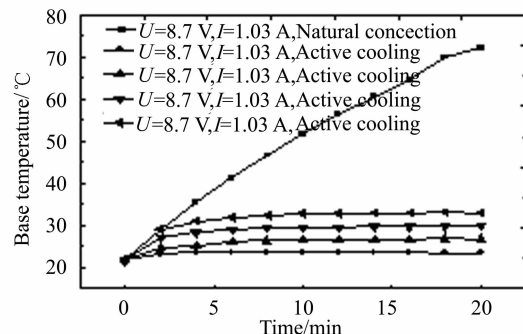


图3 液态金属散热系统实施主动散热与非主动散热效果对比

Fig. 3 Base temperature in natural convection and active cooling by liquid metal cooling system

图 4 显示了 LED 灯和 EP 分别在两种不同输入参数下基底温度随时间的变化情况。其中,LED 灯的输入参数是 $U=9.0$ V、 $I=1.48$ A,以及 EP 的输入参数分别为 $U=0.1$ V、 $I=5.99$ A 和 $U=0.3$ V、 $I=10.00$ A 时,LED 灯基座的最终温度分别稳定在 26.8 °C 和 26.1 °C;当 LED 灯的输入参数为 $U=9.4$ V、 $I=2.07$ A 及 EP 的输入参数分别是 $U=0.1$ V、 $I=5.99$ A 和 $U=0.3$ V、 $I=10.00$ A 时,LED 基座的最终温度分别稳定于 29.8 °C 和 29.6 °C。可以推断,当电磁泵的输入功率变大时,液态金属的流速将变大,流量增大,从而所带走的热量也相应增加。

图 5 显示了在液态金属系统中增加肋片和风扇的必要性。LED 灯和 EP 的输入参数分别是 $U=9.4$ V、 $I=2.07$ A 和 $U=0.1$ V、 $I=5.99$ A 时,风扇不运行时温度会不断上升,30 min 时

温度升至 72 ℃,且还有上升的趋势;而开启风扇后,基座温度很快稳定于 29.8 ℃。可以看出,通过在液态金属装置中增加肋片和风扇,可以及时地将液态金属从基座吸收的热量迅速地在远端排放到空气中,从而保证增温后的液态金属温度降低,进入下一个循环。

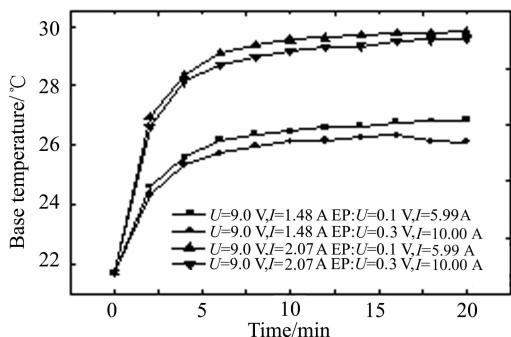


图 4 EP 在不同输入参数下 LED 灯基座的温度变化

Fig. 4 Different cooling performances in different input power of the EP

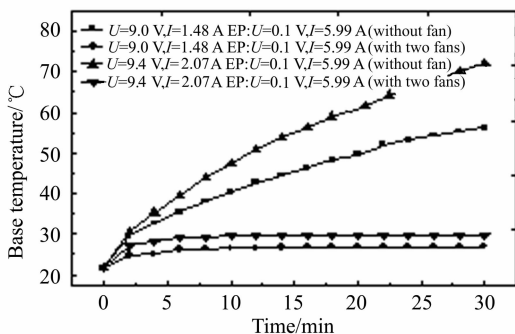


图 5 风扇的运转及大小对 LED 灯基座温度的影响

Fig. 5 Different cooling performances in different surface size and running state of the fan

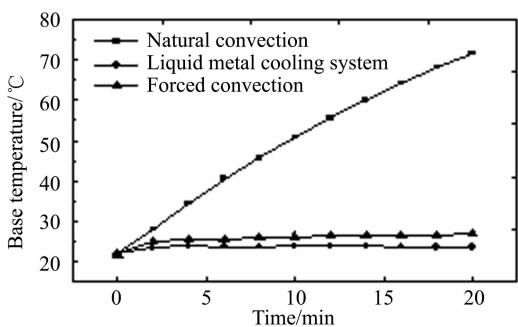


图 6 3 种不同散热方式下 LED 基座温度的变化

Fig. 6 Different cooling performances in three cooling methods

从上述试验可以看到,液态金属散热应用于 LED 灯,一个更大的优点在于其良好的导热性和流动性,可将有限空间内的

热量转移到更加开阔的空间,再通过风扇将热量传到空气中,由此避免了热量因聚集于有限空间而导致电子元件失效。如图 6 所示,当 LED 灯的输入参数为 $U=8.7\text{ V}$ 、 $I=1.03\text{ A}$ 时,仅采用自然对流的方式,LED 灯基座的温度在 20 min 后升至 71.6 ℃,并且还保持上升趋势;而采用液态金属实施主动散热后,温度很快就稳定于 23.4 ℃。当 LED 灯用风扇进行强迫对流(用风扇紧贴 LED 灯基座)时,LED 灯基座的温度稳定与 26.7 ℃。但是,一方面,受封装和噪音的影响,不能简单地直接在 LED 产品上安装风扇;另一方面,相比于实验更高功率密度的 LED 灯,仅仅用风扇是无法满足散热需求的,为保证其安全工作必须考虑热管等主动散热方式[2]。

此外,目前应用液态金属散热系统需考虑性价比,本研究中采用 Ga 或其合金作为流动工质,成本相对较高。不过,该散热循环系统采用的是 EP,其成本则可能因结构简单而得以降低。当然,随着材料技术的发展及散热系统的优化,仍可在目前的基础上将液态金属用量大大降低从而缩减成本。

本实验中认为,从环氧树脂结构上散出的热量不足 2%,热流主要从基底散出,因而基底温度变化情况反映了整个 LED 芯片热流的导出情况;此 LED 灯内的发光阵列是均匀排布的,因而可以认为基底的温度分布也相对均匀。另外,出于 LED 灯的安全运行考虑,上述部分升温实验距达到稳定值还需要更长时间,今后需要设计更多的破坏性试验。同时,LED 灯的温度由热电偶在其底座直接测取,因此误差主要来源于热电偶本身,本文情况约 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。为方便比较,每组实验的起始温度均取为环境温度,环境温度的稳定对实验结果也会造成一定的影响。不过,实验中,LED 灯的电流波动范围基本控制在 0.9% 之内,EP 的电流波动范围则控制在 1.2% 内,由此可保证试验结果相对一致。

5 结论

首次将液态金属散热方法引入到 LED 灯的热管理中,并在研制原型样机的基础上证实了新方法的高效性。典型试验结论如下:

- 1) 液态金属散热系统具有良好的热传输能力,能够及时转移 LED 灯所产生的热量,从而确保 LED 芯片安全稳定运行。
- 2) 可以推断,EP 输入功率越大,液态金属流速越高,带走的热量越多,则 LED 灯的温降越显著。
- 3) 为保证 LED 芯片安全运行,液态金属散热系统从 LED 灯中导出的热量需要通过风扇等强迫对流方式及时在远端转移到环境中。
- 4) 在实际使用中,目前应当考虑液态金属的成本,以获取较大的性价比。

参考文献:

[1] WU Hui-ying, QIAN Ke-yuan, HU Fei, et al. Study on thermal performances of flip-chip high-power white LEDs[J]. Journal of Optoelectronics. Laser(光电子·激光), 2005, 16(5): 511-514. (in Chinese)

[2] Adam Christensen, Samuel Graham. Thermal effects in packaging high power-light emitting diode arrays[J]. Applied Thermal Engineering,

- 2009, **29**(2-3):364-371.
- [3] Kim H H, Choi S H, Shin S H, et al. Thermal transient characteristics of die attach in high power LED PKG[J]. *Microelectronics Reliability*, 2008, **48**(3):445-454.
- [4] Kovac J, Peternai L, Lengyel O. Advanced light emitting diodes structures for optoelectronic applications[J]. *Thin Solid Films*. 2003, **433**(1-2):22-26.
- [5] YU Bin-hai, WANG Yao-hao. Junction temperature and thermal resistance restrict the developing of high-power LED[J]. *Chinese Journal of Luminescence(发光学报)*, 2005, **26**(6):761-765. (in Chinese)
- [6] LI Bing-qian. A new type high power lighting emitting diodes based on MCPCB and its opto-electrical characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica(光子学报)*, 2005, **34**(3):34:372-374. (in Chinese)
- [7] SU Da, WANG De-miao. New development of technical research on heat-release package of high-power LEDs[J]. *Power Electronics(电力电子技术)*, 2007, **41**(10):13-15. (in Chinese)
- [8] LV Jia-dong. A novel cooling scheme for light emitting diode-micro channel cooler[J]. *Lamps and Lighting(光源与照明)*, 2007, (1):28-30. (in Chinese)
- [9] MA Ze-tao, ZHU Da-qing, WANG Xiao-jun. Thermal analysis of high-power light-emitting diode packages[J]. *Semiconductor Optoelectronics(光电器件)*, 2006, **27**(1):16-19. (in Chinese)
- [10] FEI Xiang, QIAN Ke-yuan, LUO Yi. Junction temperature measurement and luminous properties research of high-power LED[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光)*, 2008, **19**(3):289-292. (in Chinese)
- [11] LIU Jing, ZHOU Yi-xin. A computer chip cooling method which uses low melting point metal and its alloys as the cooling fluid[P]. *China Patent*, 02131419. 5, 2002. (in Chinese)
- [12] LIU Jing. *Thermal Micro-System Technology [M]*. Beijing: Science Press, 2008. 149-151. (in Chinese)
- [13] MA Kun-LIU Jing. Heat-driven liquid metal cooling device for the thermal management of a computer chip[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2007, **40**(15):4722-4729.

作者简介:

马璐 (1986—), 女, 硕士研究生, 从事芯片散热技术的研究。