

基于多孔微热沉的大功率 LED 阵列散热实验及仿真优化设计

刘靖¹ 王永翔^{2,1} 万忠民^{1,2} 常华伟² 陈曦¹ 罗良¹ 舒水明² 刘伟²

(1. 湖南理工学院信息学院, 岳阳 414006;
2. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要 对用于大功率 LED 阵列的多孔微热沉的主动冷却方案展开了实验研究, 实验结果表明在输入功率为 45 W 的情况下, 不采用多孔微热沉换热时, LED 芯片温度在两分钟时间内就升高到了 70°C; 在采用多孔微热沉后, 在 50 s 系统就到达稳定, 而且温度仅为 38.3°C, 即使功率加大到 75 W, 温度也仅为 42.5°C。对多孔微热沉结构进行数值分析, 结果表明, 优化后的结构能提高 LED 散热效果, 并极大的改善了基板的温度均匀性, 有利于 LED 寿命和性能的提高。

关键词 多孔微热沉, 大功率 LED, 散热, 优化

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2015)09-2005-05

Experimental Analysis and Optimization Design on Porous Micro Heat Sink for High Power LED Arrays

LIU Jing¹ WANG Yong-Xiang² WAN Zhong-Min^{1,2} CHANG Hua-Wei² SHU Shui-Ming²
CHEN Xi¹ LUO Liang¹ LIU Wei²

(1. School of Information Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006;
2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract A series of experiments on an active cooling system that used the porous micro heat sink for thermal management of high power LED (light emitting diode) arrays had been conducted. The experimental results showed that in case of the LED power input of 45 W, the LED chip temperature raised up to 70°C in two minutes without the porous micro heat sink. When the heat sink was used, the system reached stability in 50 seconds and the temperature was only 38.3°C. Even though the input is increased to 75 W, the temperature is merely 42.5°C. Numerical analysis on porous micro heat sink was conducted, the results indicated that the optimal structure could enhance the effect of heat dissipation and improved the temperature uniformity on the substrate, which is beneficial to the improvement of the life and performance of LED.

Key words porous micro heat sink; high power LED; heat dissipation; optimization

0 前 言

发光二极管(LED: light emitting diode)是一种利用半导体材料发光的器件,与普通照明技术相比,其具有体积小、寿命长、能耗低、显色性好、环保等优点,所以LED已经成为研究的热点^[1]。

但是,目前LED的光电转换效率大约只有10%~20%,LED的输入功率大约有80%~90%转换为热能^[4],而且随着LED尺寸的减小和功率的提高,如果LED产生的热量不能及时有效的散发出去,使热量聚集于芯片内部,导致LED结温升高,

将引起热应力不均匀、芯片发光效率下降、稳定性降低、光谱偏移、寿命加速老化等一系列问题^[2]。因此,散热已经成为制约LED发展的主要问题之一。

对于LED的散热问题,国内外许多学者展开了相关性研究。Hun等^[3]研究了一种优化散热翅片运用于热电制冷系统,使热阻降低了9%,对热端的热吸收率比一般的散热翅片提高了将近27%。Daniel J和Schlitz^[4]将离子风散热应用于LED的散热系统上,所开发的EHD散热装置比用风扇进行强制对流

收稿日期: 2015-02-13; 修订日期: 2015-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(No.51106046; No.51376058)

作者简介: 刘靖(1968-),男,博士,教授,研究生导师,主要从事大功率LED照明技术研究。通信作者: 万忠民,教授, E-mail: zhongminwan@hotmail.com

的散热效果更好,而体积和重量下降到常规 LED 散热装置的十分之一。Bong-Min Song 等^[5]提出将合成射流技术应用于 LED 筒灯中,结果表明使用合成射流技术的筒灯在寿命周期内(50000 h)的温升影响可以忽略不计。美国通用电气^[6]将一种双压电冷却喷射技术用于电子元件的散热中,该技术喷射的高速气流比常规对流提高了十五倍的热交换速率。Ing Youn Chen 等^[7]将离子风用于 LED 散热,研究结果表明该技术能较好改善 LED 散热性能,并可实现完全静音。李琳红等^[8]提出了利用冷喷涂技术优化 LED 散热途径的方法并利用 ANSYS 软件对其进行了模拟对比,证明采用冷喷涂结合锡焊技术、降低铜基板厚度可有效降低 LED 散热热阻。

本文采用一种主动冷却方案,采用多孔芯作为热沉进行换热,整个系统是封闭的,采用微泵驱动水在系统内部管道循环。搭建了实验台架,实验中多孔微热沉采用铜外壁和 200 目的铜丝网作为多孔芯,同时对多孔微热沉进行了基于实验的数值优化模拟研究。

1 多孔微热系统工作原理

图 1 所示为多孔微热沉系统的工作原理图。系统主要由微泵、多孔微热沉、换热器及管道等组成。在系统运行前,往系统内部管道注入水,并密封好各连接口防止泄漏。当整个系统正常运行后,水受到微泵的作用进入多孔热沉,此时 LED 芯片产生的热量通过多孔介质传递给水,其温度降低,同时水吸收热量后温度升高,在微泵的作用下流出热沉进入冷却器与外界换热,将 LED 芯片产生的热量传递给外界,致使水温下降,然后重新进入微泵进行新一轮的循环。

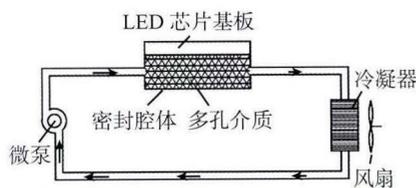


图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a porous micro heat sink system

2 多孔微热沉实验系统

图 2 所示为多孔微热沉的实验原理图。LED 芯片组为 25×25 阵列,为了减小热阻,芯片直接布置在多孔微热沉的壁面,采用导热膏或者高导热焊料相连。实验中采用高精度的 Aglient 34970A 综合数据采集仪以及 K 型热电偶对各点温度进行精确测量,

并通过 34970A Data Logger 采集软件对采集数据进行存储和分析。采用容积式流量计测量水的流量,流量计的测量范围是 5~50 L/h,测量的精度为 ±0.5%。系统的压降测量采用高精度的 FCX-A II 系列差压变送器实现的,测量的精度为 ±0.1%。微泵采用电磁原理驱动,通过可调电压源改变微泵的输入电压改变系统中工质的流量。

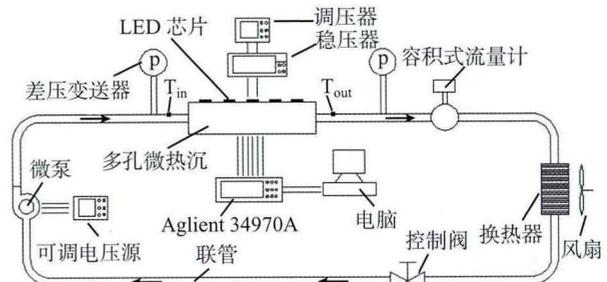


图 2 实验测量系统

Fig. 2 Experimental setup of the porous micro heat sink system

图 3 所示为多孔微热沉的结构图。实验中多孔芯采用 200 目的铜丝网,长、宽、厚的尺寸为 15 mm×15 mm×4 mm,其孔隙率为 0.5。俯视图中虚线表示多孔微热沉的有效散热面积,其大小为 15 mm×15 mm,芯片的大小为 1 mm×1 mm, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 表示热电偶测点的温度。其中入口与出口直径为 2 mm。水从入口进入,通过分流区的分流作用,使水能够均匀的流入多孔芯,使微热沉加热表面温度更加均匀。通过多孔芯高效换热,带走作用在热沉上的热量,通过汇集区将水从出口带走。图 T_{in} 、 T_{out} 分别表示微热沉进口与出口的测点温度。

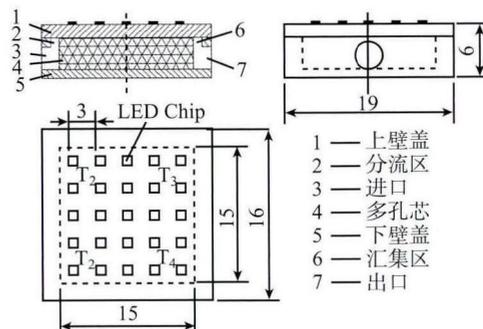


图 3 多孔微热沉结构

Fig. 3 Cross sectional views of porous micro heat sink

2 实验结果及讨论

LED 芯片基板平均温度 $T_a = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) / 4$, 该温度反映了平均散热效果。实验中的微泵的流量为 1.6 mL/s, 由于入口直径为 2 mm, 所以相应的入

口流速大约为 0.5 m/s。

图 4 为 3 种不同工况下测温点随时间变化的关系。图 4(a) 为 LED 芯片阵列的输入功率为 45 W, 微泵开始不通电, 在 2 min 后通电运行。从图中可以看出, 当冷却系统不工作时, LED 芯片的温度在 2 min 内从 29.5°C 上升到了 70°C 左右。图 4(b) 所示同等工况下, 开启微泵, T_3 点温度、平均温度 T_a 及热沉出口水温随时间的变换关系。从图中可以看出, 微泵通电后 LED 的温度在 50 s 内仅从 29.5°C 上升到了 38.3°C 并保持稳定, 而且 T_a 为 36.6°, 而出口温度为 30.9°C。这说明多孔微热沉能较好地实现系统散热平衡。图 4(c) 所示为 LED 芯片输入功率增

大到 75 W 时, T_3 节点温度、平均温度 T_a 及出口水温随时间的变换关系。从图中可以看出, 当输入功率为 75 W 时, LED 芯片温度为 42.5°C, 可见也能维持在较低的温度水平。

实验结果说明, 即使在高热流密度下, 多孔微热沉能较快地实现系统平衡, 表面温度达到平衡的时间大约为 50 s, 可见冷却系统热响应快, 且达到稳定温度后, 温度的波动较小, 同时加热表面能维持较低的温度水平。停止加热后, 加热表面的温度能够迅速的降低到初始状态, 多孔微热沉冷却系统能够很好对大功率 LED 阵列进行冷却, 使 LED 芯片温度维持在可靠的温度范围, 改善 LED 发光性能, 提高使用寿命。

4 数值模拟及实验验证

多孔微热沉是系统的主要散热部分, 其散热效果直接影响整个系统的散热性能, 热沉整体尺寸及进出口参数对换热性能有很大的影响, 为了进一步提高微热沉的散热性能, 降低芯片基底的温度不均匀性, 需要运用数值仿真方法对微热沉进行优化。

在数值计算过程中, 模型尺寸与实验所用尺寸完全一致, 为了简化计算, 作如下假设: LED 芯片是平面均匀热源; 入口流速均匀; 忽略热辐射的影响。同时根据大量试验经验, 模拟中铜腔体与环境的换热系数是 8 W/(m²·K), LED 芯片的发光效率为 15%。

图 5 所示为实验 T_3 点温度与模拟 T_3 点温度对应关系, 图中比较了数值模拟的芯片稳态温度和实验测量的芯片温度差异。在实验条件下, 输入功率为 45 W 和 75 W 的芯片温度都在 50 s 左右趋向于稳定, 输入功率为 45 W 的 T_3 点实验温度为 38.3°C, 而数值计算温度为 37.8°C, 温差仅为 0.5°C; 输入功率为 75 W 的 T_3 实验温度为 42.5°C, 而数值计算温度为

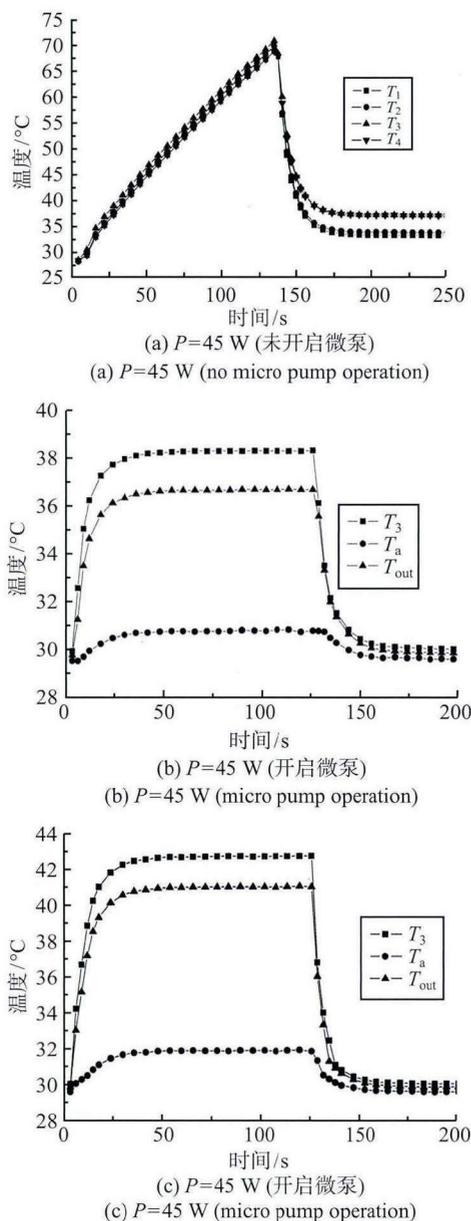


图 4 测点温度随时间的变化

Fig. 4 Measuring point temperatures variation with time

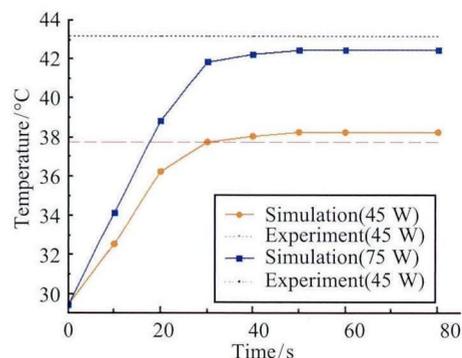


图 5 实验 T_3 点温度与数值计算 T_3 点温度关系

Fig. 5 T_3 variation with time for experiment and simulation

43.2°C, 温差仅为 0.7°C。在两种不同的输入功率的情况下, 实验测量和模拟的温差差距都不到 1°C, 这说明数值模拟所选用的模型和方法是合理的, 能反映真实的系统换热效果, 可为微热沉的优化提供理论工具和基础。

5 微热沉结构优化

为了更好的解决大功率 LED 散热问题, 除了实验热沉结构外, 现提出两种不同的热沉结构, 通过已验证的数值模型来进行模拟分析, 并将三种结构的模拟结果进行比较。三种结构的模拟条件都采用实验所用的参数, 即: 工质质量流量为 1.6 mL/s, 外界温度为 29.5°C, 进出口直径为 2 mm, LED 输入功率为 45 W。

5.1 实验多孔微热沉结构

实验微热沉在 45 W 输入功率下的稳态温度场如图 6 所示。从图中可以看出, 整个温度场最高的温度是在多孔微热沉靠近出口的两个角的 LED 芯片, 最高温度为 39.2°C, 并不是实验所布置的 T_3 测温点的温度, 为后续实验测温点的布置提供了依据。基板的温度为前部分和两边低, 而后半部分和旁边高。由于工质流入热沉时, 开始吸收从 LED 散出的热量, 温度升高, 继而影响到了下流的换热, 导致基板靠近流体出口的温度更高。整个温度场的温度梯度大, 分布均匀性较差, 影响 LED 的使用性能。图 7 所示为热沉 $Z = 0$ 截面的流场分布图。从图中可以看出, 流场中部的流速高, 四周低, 且在靠近基板下表面的流动扰动很小, 导致基板的中部温度较低。在允许 LED 节点温度水平范围内, 散热表面温度越均匀, 对提高电子元器件的寿命和可靠性是非常有利的, 反之, 则容易降低器件的可靠性, 导致器件失效 [9]。因此为了改善 LED 的工作状况, 须要对实验用多孔热沉结构进行优化。

5.2 第一种改进的多孔微热沉结构

将单进单出结构改为双进双出, 进出口尺寸及位置如图 8。图 9 所示为芯片和基板的稳态温度分布。图中可见, LED 基板的温度大幅度降低, 整个温度场最高的温度仅为 38.1°C, T_3 点的温度为 36.7°C, 且热均匀性更好。图 10 是 $Z = 0$ 截面的速度矢量图。从图中可见, 相比于实验结构, 这种结构的速度场在热沉内部扰动的范围更大, 致使热沉内部换热更为明显, 但在靠近基板下面的流动扰动还是很小。因此双进双出的结构在一定程度上将有效的改善 LED 的散热, 但速度扰动还是集中在进出口连接线上, 未能很好的把扰动扩散到整个流场中, 导致

基板前后的温度梯度还是很大。

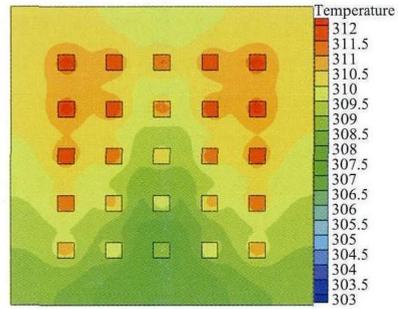


图 6 45 W 实验结构的模拟温度场
Fig. 6 Temperature field in the substrate of experimental structure

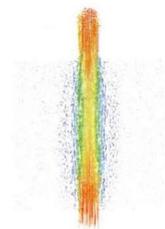


图 7 实验多孔微热沉内部截面的流场分布 ($Z = 0$)
Fig. 7 Liquid velocity vectors in the experimental porous micro heat sink

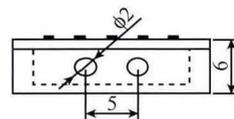


图 8 第一种改进结构的进出口示意图
Fig. 8 Outlet structure of the first optimal heat sink

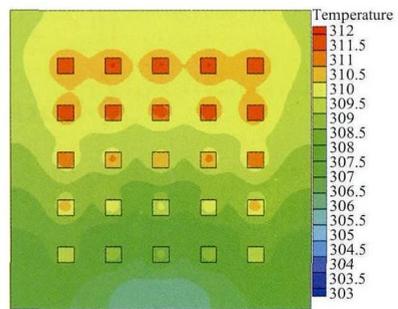


图 9 第一种改进结构基板和芯片的温度场
Fig. 9 Temperature field in the substrate of the first optimal heat sink

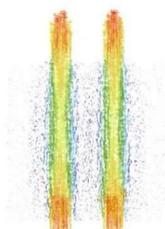


图 10 第一种改进结构热沉内部截面流场 ($Z = 0$)
Fig. 10 Liquid velocity vectors in the first optimal heat sink ($Z = 0$)

5.3 第二种改进的多孔微热沉结构

图 11 为改进后的双进双出结构, 将进口和出口错开, 不在一个平面上, 同时把热沉内部分为上下两部分, 上部分用多孔芯填充, 下部分是导流空腔。当流体受到微泵的作用流入空腔, 在一定的压力作用下向上部分的多孔芯流动, 流体直接冲击芯片基板下表面, 同时增加多孔芯内部扰动, 获得更强烈的换热效果。图 12 为基板温度场分布图, 从图中可以看出, 芯片最高温度仅为 38.2°C , T_3 点的温度为 36.7°C 。虽然换热性能没有显著的提升, 但是整个基板的热均匀性得到了很大改善, 基板 LED 的温度梯度保持在 3°C 以内, 可以预计这将有提高 LED 的寿命和工作性能。图 13 为 $Z=1$ 的截面的速度矢量场, 可以看出, 热沉扰动有很大的变化, 特别是在 Z 方向和靠近基板下表面处流体扰动增大了, 使得多孔芯内部扰动更为强烈, 导致基板和芯片温度梯度减小。可见这种结构在一定程度上能加强 LED 的散热, 改善温度场的热均匀性。

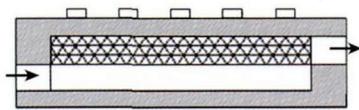


图 11 第二种改进结构示意图

Fig. 11 Outlet structure of the second optimal heat sink

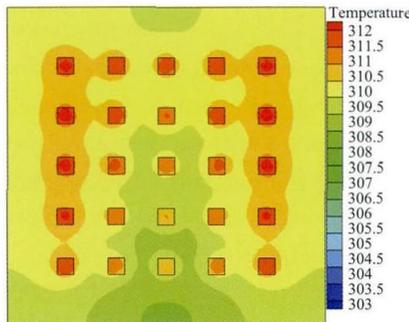


图 12 第二种结构基板和芯片的温度场

Fig. 12 Temperature field in the substrate of the second optimal heat sink

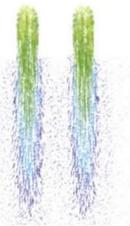


图 13 第二种改进结构热沉内部截面流场 ($Z=1$)

Fig. 13 Velocity vectors in the second optimal heat sink ($Z=1$)

6 总 结

LED 照明技术由于其诸多优点正在成为近年来研究的热点, 但 LED 散热问题一直制约大功率 LED 的发展。针对这个问题, 本文将多孔微热沉主动散热方案用于对大功率 LED 阵列, 并进行系统实验和数值模拟优化设计。通过研究表明:

- 1) 多孔微热沉散热系统具有优良的散热能力, 并且热响应快, 极大的改善了基板的温度热均匀性;
- 2) 通过对比实验和数值模拟结果, 发现提出的计算模型可以作为系统进一步优化参数和分析的工具;
- 3) 采用双进双出, 且进出口错开, 热沉腔内一半为空腔, 一半用多孔芯填充的新结构可以更好改善 LED 散热效果, 这将有提高 LED 的寿命和工作性能。

参 考 文 献

- [1] Zukauskas A, Shur M S, Gaska R. Introduction to Solid-State Lighting [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002: 21-29
- [2] ARIK M, WEAVER S. Chip Scale Thermal Management of High Brightness LED Packages [C]// Proc. SPIE 4th Int. Conf. Solid State Light, Denver, CO, 2004: 214-223
- [3] Hun S H, Seo Y K, Tae H J, et al. Heat Sink Design for a Thermoelectric Cooling System [C]// 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Orlando, FL, 2008: 1222-1230
- [4] Daniel J, Schlitz. Electro-Hydrodynamic Gas Flow LED Cooling System: US, 20100177519 [P]. 2010
- [5] Bong-Min Song, Bongtae Han, Avram Bar-Cohen, et al. Life Prediction of LED-Based Recess Downlight Cooled by Synthetic Jet [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(5): 937-948
- [6] H Peter de Bock, Pramod Chamrathy, Jennifer L Jackson, et al. Investigation and Application of an Advanced Dual Piezoelectric Cooling Jet to a Typical Electronics Cooling Configuration [C]// 13th EEEI THERM Conference, San Diego, CA, 2012: 1387-1394
- [7] Ing-Youn Chen, Mei-Zuo Guo, Kai-Shing Yang, et al. Enhanced Cooling for LED Lighting Using Ionic Wind [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57(1): 285-291
- [8] 李琳红, 陈清华, 柴伟伟, 贺志强. 冷喷涂技术应用于大功率 LED 散热的研究 [J]. 材料导报, 2012, 26(06): 158-160
Li Linhong, Chen Qinghua, Cai Weiwei, et al. Thermal Studies of High-Power LED with Cold Spray Technology [J]. Materials Review, 2012, 26(6): 158-160
- [9] Yuri S M. Influence Coefficient Method for Calculating Discrete Heat Source Temperature on Finite Convectively Cooled Substrates [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(3): 636-643