

基于微喷射流的高功率 LED 散热方案的 数值和实验研究

罗小兵^{①②} 刘 胜^{②③*} 江小平^{②③} 程 婷^①

(① 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074; ② 武汉光电国家实验室(筹)MOEMS 研究部, 华中科技大学, 武汉 430074; ③ 华中科技大学微系统中心, 武汉 430074)

摘要 提出了一种基于封闭微喷射流的高功率LED主动散热方案,系统采用一个微泵来驱动,依靠封闭微喷系统实现大功率发光二极管(LED)芯片组的高效散热.对没有采取数值优化情形下设计的上述散热系统开展了实验研究,对比实验表明:在不采用上述系统和完全依靠自然对流散热情形下,对 2×2 LED 芯片组输入 16.4 W 的电功率,运行 10 min 后,芯片表面平均温度为 112.2°C,但采用上述冷却方案后芯片表面测量温度仅仅为 44.2°C.实验中改变微泵的流量,结果表明:微泵的流量增加将提高散热效率,但将相应增大消耗功率.对微喷散热实验系统同时开展了数值研究,计算结果发现:对 2×2 芯片组输入 4 W 电功率的情形,稳态数值计算下芯片表面平均温度为 34°C,与实验测得的接近稳态下的温度 32.8°C 相当,这表明该模型可以用于数值优化.数值计算结果还表明:实验用微喷射流器件需要开展参数优化.

关键词 高功率 LED 封闭系统 微喷射流 散热

大功率发光二极管(LED: light emitting diode)器件为核心的半导体照明技术由于相比普通照明技术具有较多的优点,近年来已经成为研究和开发热点.目前,普通光源主要为白炽灯、卤钨灯和荧光灯等,理论上,LED相比这些光源主要有如下几点优势^[1]. 1) 发光效率高、光的单色性好、光谱窄、无需过滤就可直接发出有色可见光. 2) 节能、耗电量少. 在同样的照明效果下,LED的耗电量是白炽灯泡的八分之一,是荧光灯管的二分之一. 3) 使用寿命长. LED灯体积小、重量轻、用环氧树脂或者硅胶封装,机械强度大,耐振动和冲击.理论上LED的平均寿命达 10 万小时,是普通灯管的数十倍. 4) 安全环保. LED为全固态发光体,发热量低,无热辐射,是冷光源,不含汞、钠等可能危害健康的物质,废弃物可回收,没有污染. 由于具有上述优点,LED开始在许多应用中发挥着作用,典型的应用有^[2]: 手机及其他LED显示的背光源,

显示和标志牌, 信号灯等。

对高功率LED, 光学设计和热管理是其获得高性能的两个关键因素。虽然理论上LED的发光效率很高, 但由于没有有效的散热方式, 目前, LEDs的实际发光效率仍然比较低, 大部分LED芯片的最终发光效率只有10%~20%, 这意味着80%~90%的电能转化成了热量。一般说来, 这些热量将极大地降低照明效率。除了降低照明效率, 高温还将导致LED发光颜色的改变。另外, 较高的LED运行温度还将使得LED的寿命快速下降, 关于这一点, Narendran 等人^[43]已经通过实验证实: LEDs的寿命与LED芯片结温的增加成指数形式下降。上述几点表明: LED的工作温度越低越好。但是, 在实际应用中经常需要LED具有高功率和高封装密度以获取高亮度, 这必定导致功率密度和运行温度间形成矛盾, 特别是当应用条件需要LED满负荷运行以获得理想的亮度的时候, 这个矛盾更加突出。上述矛盾给高亮度LED的热管理提出了挑战, 它迫切需要良好的散热措施来解决LED的热问题。

为了有效解决LED的散热问题, 国内外不少研究者开展了相关热问题研究。在国外, Arik 等人^[44]采用有限元方法开展数值模拟, 求解了LED芯片温度分布并评估了局部高温对芯片有源层的影响。Sano等人^[45]报道了一个具有优秀散热能力的超亮度LED模块, 该模块采用具有出色热导能力的铝基板来散热。Petroski^[46]开发了一种新型热沉来实现高功率LED的冷却, 该热沉基于自然对流来实现换热。它采用圆柱结构, 周围布满了纵向分布的翅片, 该设计可实现散热效果各向同性。Chen等人^[47]采用硅加工的热电制冷器(TE cooler)来冷却高功率LED。他们的测试结果表明该冷却方法能有效地降低高功率LED的热阻。Hsu等人^[48]报道了一种用于LED封装的金属粘结方法, 该方法可以实现较好的散热效果, 有效地降低热阻。Zhang等人^[49]采用多壁面的碳纳米管和碳黑作为热界面材料来封装高亮度LED, 测试结果表明该措施能有效地降低LED的热阻。Acikalin 等人^[40]采用主动冷却方法降低LED工作温度。他们利用小型压电风扇来形成强迫对流, 测试结果表明该措施能将热源温度下降37.4℃, 压电风扇可以作为电子器件和LED冷却的一个具有竞争力的热管理手段。

在国内, 不少研究者也开展了LED热管理方面的研究。吴慧颖等人^[41]利用有限元方法对1W级倒装大功率白光LED的空间温度场分布进行了模拟计算, 模拟结果与测量的温度分布相吻合。在上述数值模拟的基础上, 他们还研究了芯片尺寸与结温的关系, 结果表明: 在一定的发光效率和封装结构条件下, 由于散热条件的限制, 芯片的设计尺寸和能承受的最大功率必须优化设计。余彬海等人^[42]分析了芯片衬底材料对大功率LED的热特性的影响机制。他们建立了倒装芯片衬底粘接材料的厚度和热导系数与粘接材料热阻的关系曲线, 以三类典型粘接材料为例计算了不同厚度下的热阻, 得出了倒装芯片衬底粘接材料的不同对大功率LED的热阻存在较大影响的结论。陈颖等人^[43]采用热阻抗模型来预测LED工作时结点处的温度, 并用它来指导设计高功率LED光源时所需散热装置。通过与实际情况的比较, 他们验证了热阻抗模型的可行性和它的高功率LED光源热量管理设计时的指导性作用。马春雷等人^[44]叙述了利用动态电学测试方法测量高功率LED热阻和结温的原理、试验装置、测量步骤和影响测试结果的因素。他们的研究表明: 该方法具有测试结构简单、稳定性高等特点, 可作为高功率LED热阻和结温的标准测试方法。王玉田等人^[45]对LED热特性开展了分析, 并推导出了反映热特性和光输出功率的工程计算公式, 基于该公式, 他们计算了脉冲输入条件下LED的光功率输出, 分析了不同参数比如脉宽、站空比等对光功率输出和发热量的影响。

本文提出了一种主动冷却方案来实现高功率密度LED的散热, 该方案采用系列微喷进行

换热, 整个系统采用封闭形式, 由一个微泵驱动系统循环, 气体、液体包括水甚至金属液体等均可以作为工作介质, 微喷组依靠冲击射流的良好换热效果, 将热量从 LED 带入冷却系统从而实现散热. 对上述系统开展了大量实验, 实验结果表明其拥有较好的散热能力. 为了改进目前的设计, 对实验系统开展了数值研究, 与已有的实验结果进行了比较, 计算结果发现: 数值模型可以作为下一阶段分析的手段, 目前设计的实验系统需要开展参数优化.

1 封闭微喷冷却系统

图1显示了基于微喷射流组的封闭流体冷却系统, 它易与被冷却 LED 芯片封装. 为了减少系统扭曲和元器件间的局部应力问题, 采用一种特殊的封装结构和方法来减少冷却系统与芯片的整体和局部的不对称.

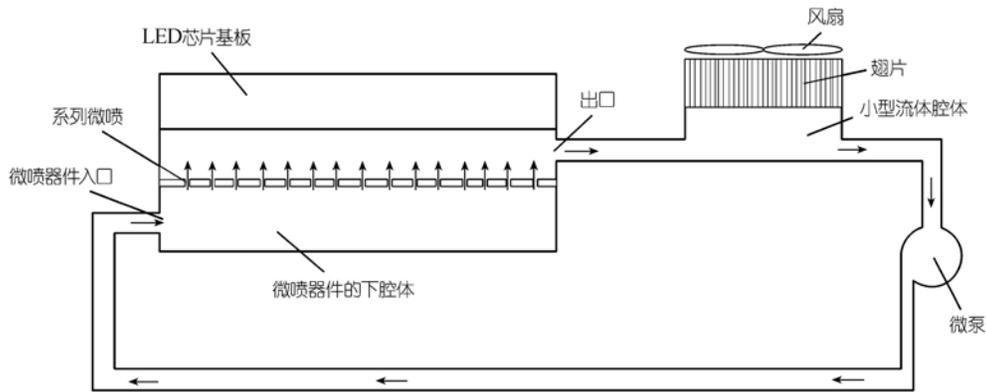


图 1 系统原理图

系统封装和运行前, 通过连接口注入一定的流体进入系统, 然后密封各连接口以防止流体泄露. 当泵通电运行后, 小型流体腔体中的流体通过微喷器件入口流入射流腔, 在一定的压力下通过系列喷口形成强烈的射流, 射流直接冲击芯片基板下表面或者扰动流体, 产生强烈的换热效果, LED 芯片产生的高热流被射流吸收, 其温度急剧下降, 流体由于吸收了热量温度升高, 在泵的作用下, 升温的流体通过微喷器件出口流出, 进入小型流体容器, 在热沉和风扇的作用下, 热流体和环境发生换热, 使温度下降, 低温流体重新流入泵中开始新一轮循环.

图 2 为单面喷射的微喷组. 图中流体从入口流入, 经过微喷冲击微喷器件的上壁面, 该壁面由高导热材料构成, LED 芯片基板直接放置在微喷器件上面, 为了减小接触热阻, 它们之间采用导热膏或者高导热焊料相连. 低温的射流与高温的 LED 芯片基座接触后, 流体的温度升高, LED 芯片温度降低, 升温后的流体从出口流出.

为了满足 LED 的不同应用, 图 2 所示的微喷器件可以改成多种结构, 冲击射流腔体可以设计成多面体或者圆柱桶形状, 微喷布置在多面体或者圆柱桶内表面, 相应地, LED 芯片布置在它们的外表面, 这样一种设计方便了多面布置的 LED 的散热.

上述冷却系统采用冲击射流喷换热, 由于冲击射流换热系数大^[16,17]、换热效果好, 因此高散热效率是其最显著的优点. 由于采用多个微喷, LED基板可以得到均匀的温度分布.

2 实验系统

图 3 为图 1 所描述系统的实物图, 其结构设计和原理与图 1 和 2 基本相同, 图 3 中的热沉

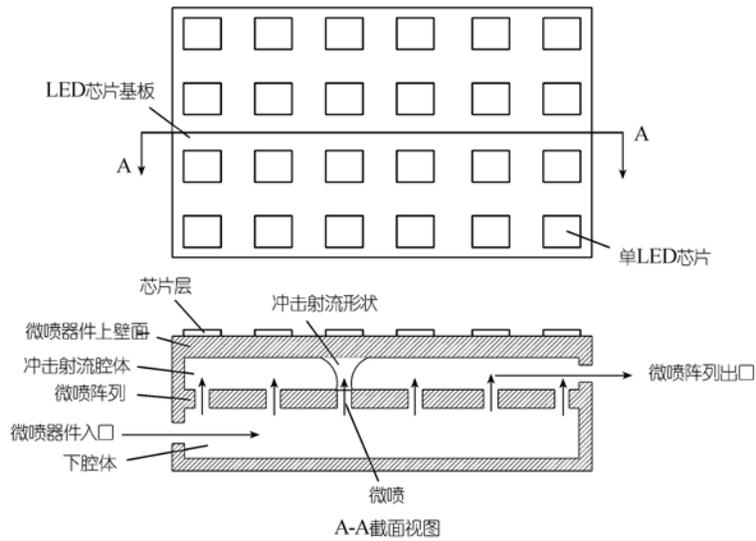


图 2 单面喷射的微喷组

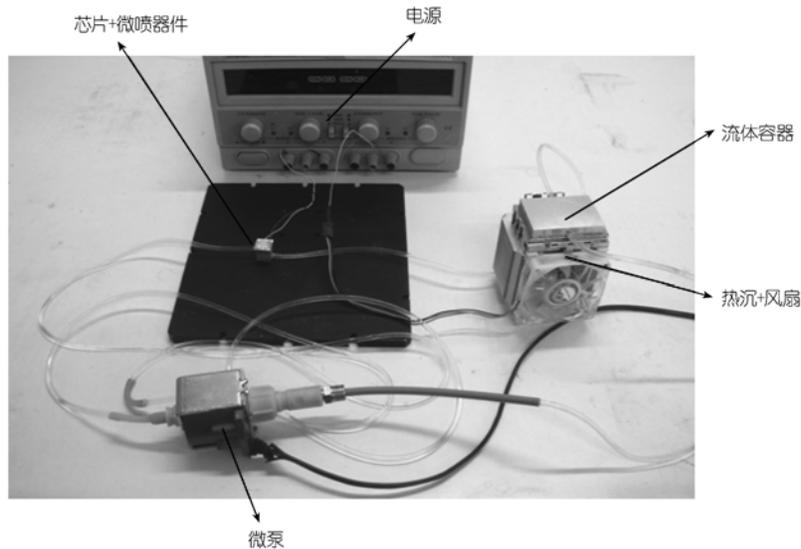


图 3 实验测试系统

和风扇布置在流体容器的下面，与图 1 中的描述相反，但功能和效果没有明显区别。值得说明的是图 3 所示系统为实验装置，实际应用中微泵和热沉风扇的尺寸均需要减小。图 4 为 2×2 并列布置 LED 芯片在微喷器件冷却下的实验图，LED 芯片表面温度的测量采用 Raytek 非接触式红外温度测试仪进行，该温度数值与 LED 芯片节点温度有一定的区别，但其可以直观地反映节点温度的大小。上述实验中主要的参数和细节为：微泵采用电磁原理驱动，输入电压可以调整以改变流量，在缺省情形下，微泵输入电压为交流 220 V，流量为 10 mL/S。单个微喷的设计直径为 0.5 mm，微喷组为 4×4 阵列。工作介质为水，热沉和风扇是在电脑市场上直接购买的非常普通的产品，实验中小水箱的尺寸是根据购买的热沉上表面大小设计的。实验用 LED 芯片

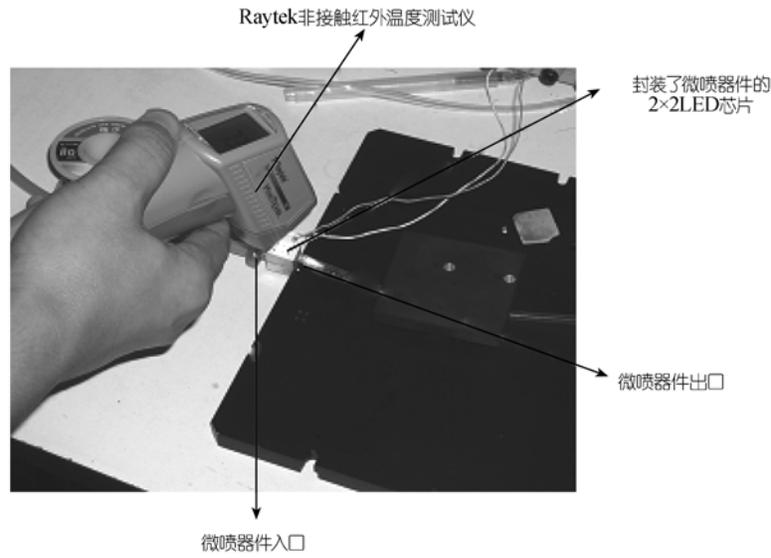


图 4 LED 芯片表面温度的测量

单个尺寸为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$, 其基座尺寸为 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$, 芯片间的距离为 3 mm . 图 5 给出了测试用芯片组和相关电极的详细尺寸.

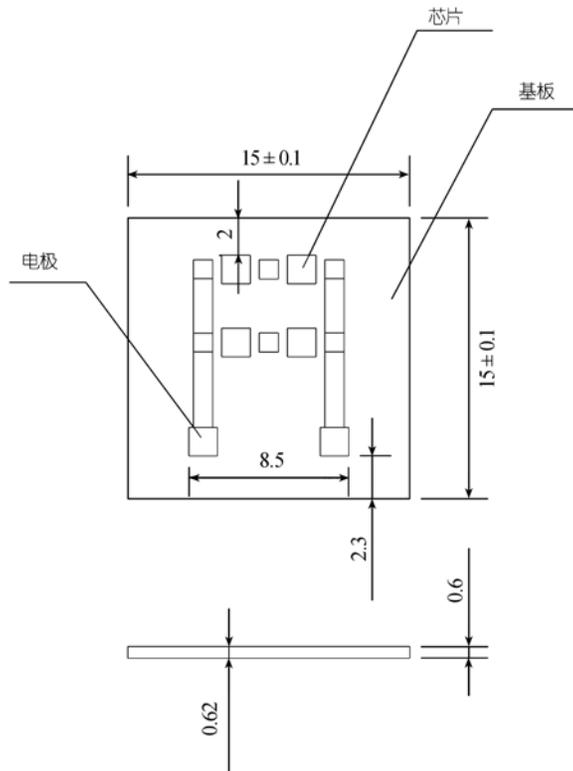


图 5 测试用芯片组的具体尺寸

实验用微喷器件的具体尺寸如图6所示. 由于下腔体的尺寸与上腔体完全相同, 故图6仅仅显示了上腔体的尺寸. 图6中上腔体的长和宽均为8 mm, 高度为6 mm, 上腔体上的出口直径为4 mm. 腔体内部的微喷个数为16个, 均匀布置在8 mm×8 mm的面积上, 这样各微喷的间距为1.6 mm. 由于LED芯片基板直接布置在微喷腔体的上部, 因此微喷距离顶板的高度为6 mm. 微喷器件的下腔体完全与上腔体相同, 下腔体上的入口的直径为4 mm.

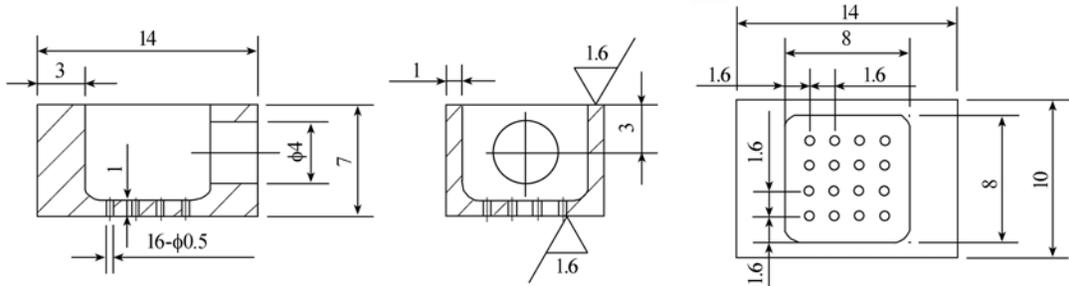


图6 实验用微喷上腔体的尺寸图

值得特别说明的是, 实验系统的所有设计尺寸没有特别地进行优化设计以获得更好的性能, 进一步的数值模拟和优化工作需要开展.

3 实验误差分析

温度为实验分析的主要参数, 它由 Raytek 红外测温仪直接测量获得. 由于没有其他的间接测量参数, 因此实验中出现的误差主要为红外测温仪误差. Raytek 红外测温仪的精度对日常90%的测量物体可以达到98%的精度, 也就是说实验误差大约为2%.

4 实验结果及分析讨论

图7反映了散热方案的实验对比结果, 实验过程中微泵的流量为10 mL/s, 由于入口直径为4 mm, 因此相应的入口流速大约为0.8 m/s, 微喷的平均速度为3.18 m/s. 图7中纵坐标为红外温度测试仪获得的LED的表面平均温度, 横坐标为LED通电流时间. 我们开展了多组实验,

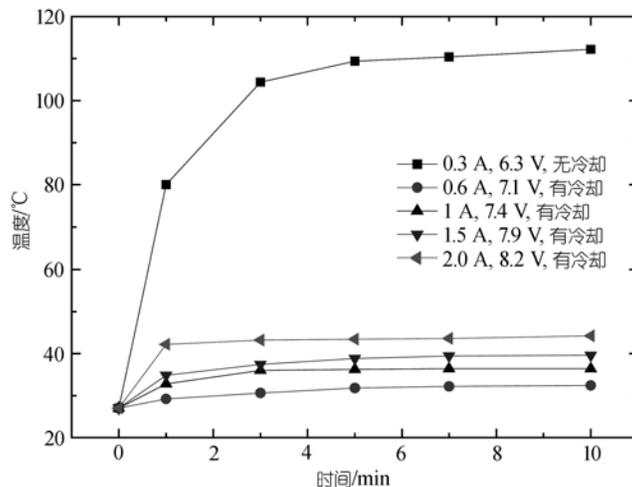


图7 散热效果对比结果

实验中 LED 的输入电流分别为 0.3 A, 0.6 A, 1 A, 1.5 A, 2 A, 相应的电压分别为 6.3 V, 7.1 V, 7.4 V, 7.9 V, 8.2 V. 为了对比冷却系统的散热效果, 当输入电流为 0.3 A 的时候, 冷却系统不工作. 从图 7 可以清楚地看出, 当散热系统不工作的时候, LED 芯片仅仅依靠芯片下面的金属块自然对流散热, LED 的表面温度升高很快, 在 0.3 A 和 1.89 W 的输入功率下, 其表面温度在 10 min 内从 27°C 增加到 112.2°C. 然而, 当冷却系统工作时, 在 0.6 A 和 4.26 W 的输入功率下, LED 表面温度仅仅从 27°C 变化到 32.4°C. 这一比较表明了散热方案能够有效地降低芯片温度. 图 7 还表明: 采用微喷散热方案, 即使电流增加到 2 A, 电压为 8.2 V, LED 的表面温度在 10 min 内仅仅从 27°C 增加到 44.2°C. 上述实验结果说明, 采用微喷散热方案, LED 芯片可以工作在较大的输入电流和功率下, 同时其工作温度较低, 这表明采用该散热方案下的芯片有潜力获取高亮度. 同时, 由于 LED 芯片工作在较低的温度下, 可以预计它的光输出效率和光的质量将得到提高, 寿命得以增加.

图 8 显示了不同输入功率和微泵流量下 LED 表面温度随着通电时间的变化, 图 8 中纵坐标 ΔT 为 LED 表面测量温度与测量当时环境温度之差, 实验中每一种测量工况下, 环境温度稍有差异, 为了更有效地反映微泵流量的变化导致的冷却效果变化, 这里采用了相对温度. 从图 8 可以看出, 在相同 LED 输入电流和功率情形下, 微泵流量较小的时候, LED 表面相对温度要高. 比如在 2 A 电流输入, 8.2 V 电压作用下, 当微泵流量为 2.5 mL/s 时, LED 的表面温度相对当时环境温度升高了 28°C, 而同样的输入电流和电压情形下, 当微泵流量为 10 mL/s 时, LED 组的表面温度只相对环境温度升高了 17.2°C. 这就是说, 系统运行流量小的时候冷却效果较差. 上述现象可以解释如下: 由于系统运行流量大, 流体能够快速带走 LED 热量. 另外, 在同样的喷嘴直径下, 流量大的情形下冲击射流的平均速度要大, 冲击换热的效果更好. 基于上述实验, 在实际应用中, 在微泵的流量和微泵功耗两者之间, 必须有所权衡. 大的微泵流量意味着好的散热效果与更好的 LED 发光效率和寿命, 但同时也相应地提高了系统的运行成本.

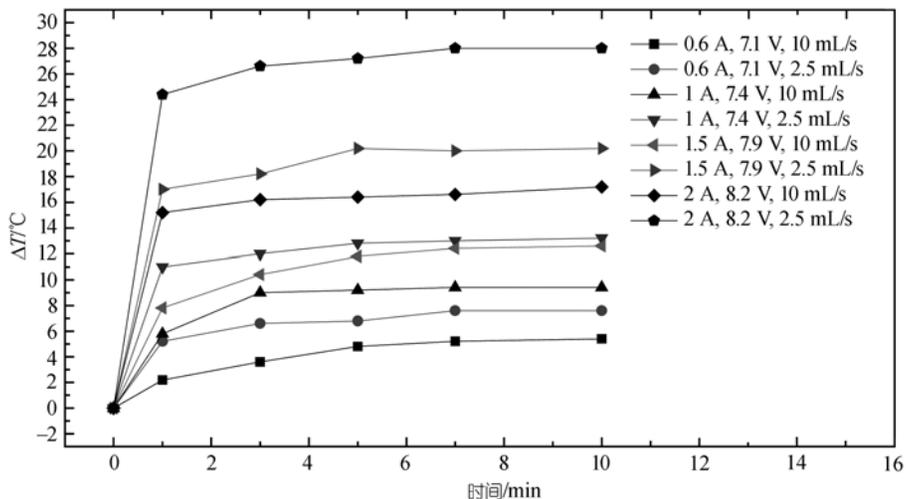


图 8 不同输入功率和微泵流量下的 LED 表面相对温度随着时间的变化

图 9 显示了系统中风扇在不同工作状况下 LED 表面温度随着时间的变化, 实验中风扇的输入功率为 1.6 W. 由图 9 可见, 在 LED 输入电流为 1A, 施加电压为 7.4 V 的情形下, LED 工作 10 min 后, 风扇工作时 LED 表面温度要比风扇不工作时候低 4.8°C. 显然, 翅片上风扇工作

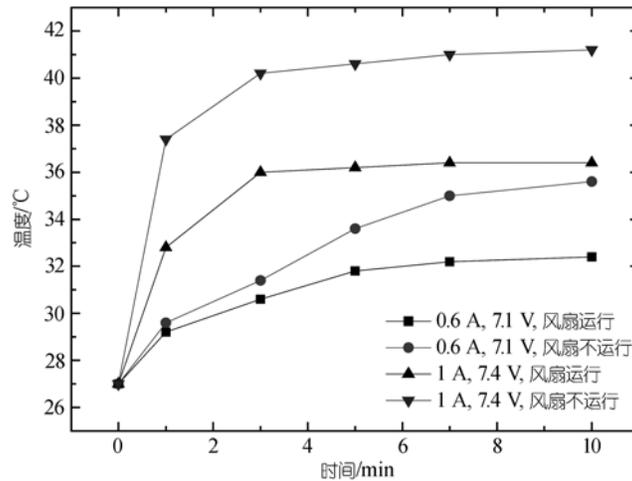


图9 翅片上的风扇在不同工作状况下LED表面温度随着时间的变化

的时候,系统散热效果要好很多.上述现象比较容易理解,系统循环水在获取LED的热量后,温度升高,水中热量如果不及时散发到环境中,那么系统循环水温将持续升高,散热效果将急剧下降,最终无法为LED降温.在设计系统中,循环水与环境交换热量的主要途径为翅片和风扇,当风扇不工作的时候,冷却系统与环境热交换将主要通过翅片的自然对流和沿层连接管的散热.反之,当风扇工作的时候,系统与环境的主要热交换为强制对流,换热效果将有效地改善.

上述实验表明,所提出的封闭微喷冷却系统作为LED散热的一种方式,具有较好的散热效果,与LED的接触热阻大幅度下降.其另外一个优势为将大量的集中在有限空间中的热量高效转移到更开阔的空间,因此方便了设计和应用.

但对该散热方案,由于采用主动散热设计,系统中具有微泵等器件,这在一定程度上增加了成本,因此,实际应用选择的时候必须在成本和性能之间权衡.对许多大规模高功率密度LED器件,被动散热措施无法满足需要,采用本系统将有效解决问题.

在上述实验中,有几点需要说明:1)实验过程中,微泵本身有一定的发热量,部分热量也将传递到系统循环水中,这在一定程度上加重了系统的热负荷,因此,在系统实际应用中,微泵本身的发热量将是系统优化、特别是微泵选择的重要考量指标;2)通过红外温度测量仪测量得到的LED芯片表面温度是近似平均值,它在一定程度上反映了LED芯片节点温度大小,该温度值作为评价本散热系统的能力能够满足精度需求,事实上,即使是LED表面也存在温度梯度,精确的温度测量需要采用高精度热像仪或其他设备进行;3)实验过程中每个工况下测量的时间是基于LED温度趋向稳定来确定的,测试时间较短,从评价系统可靠性上考虑,测试时间应该大幅度延长,进一步的工作正在进行中.

5 微喷器件的数值模拟

微喷器件是图1所示散热系统的主要部分,它的散热效果直接影响整个系统的冷却性能.前面所描述的实验系统,特别是微喷器件没有开展有意识地优化设计,但显然微喷和微喷腔体等尺寸对换热效果有很大的影响.由于实验用微喷器件非常小且系统封闭,布置传感器几

乎不可能,开展相关的实验测量有很大的难度,数值模拟能有效地解决这个问题.为了寻找合适的模拟模型以实现数值优化,有必要开展一定的数值研究并与已有实验进行初步的比较.

从图 2 可以看出,微喷器件内部有流体流动,外部则有壳体与芯片和芯片基板的导热及与环境的对流换热,因此它是耦合的传热问题.数值模拟采用商用软件 Fluent 6.2 来开展.

图 10 显示了微喷器件的模拟模型,流体入口为恒定流量 10 mL/s,也即为恒定流速 0.79 m/s,工质为水,微喷金属壳体为不锈钢,所有材料和参数包括微喷器件的尺寸参数与前述实验保持一致,微喷入口水流温度保持在 27°C 左右,其他微喷参数如图 6 所示.由于入口雷诺数为 3876,微喷器件内部为湍流状态,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,计算开始前研究了网格对计算结果的影响,以确保网格对计算结果的影响误差在 1% 以内.

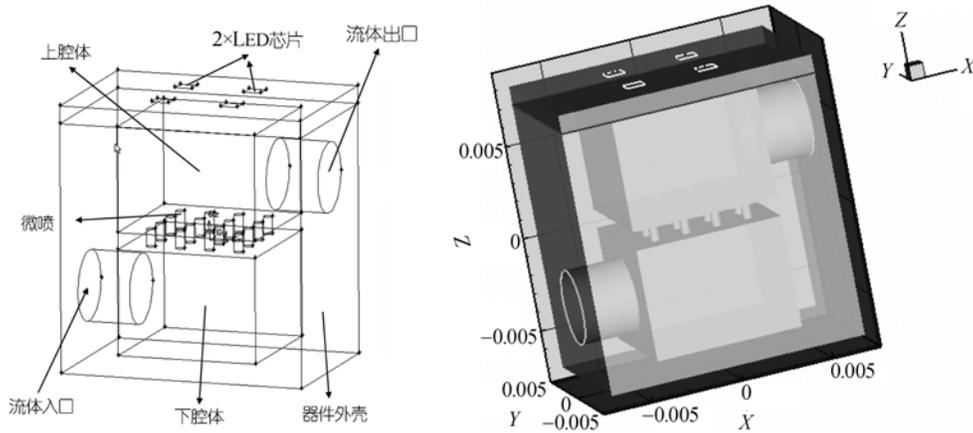


图 10 模拟模型的某视角侧视图

图 11 比较了数值模拟的芯片稳态温度与实验测量的芯片温度的差异. 30 min 实验测量的芯片表面温度趋向于稳定,接近 32.8°C,完全同样条件下的数值模拟的稳态结果为 34°C,两者较为接近,这表明数值模拟所用模型能反映真实的系统,可以作为数值优化的工具,为系统的下一步优化设计提供基础.

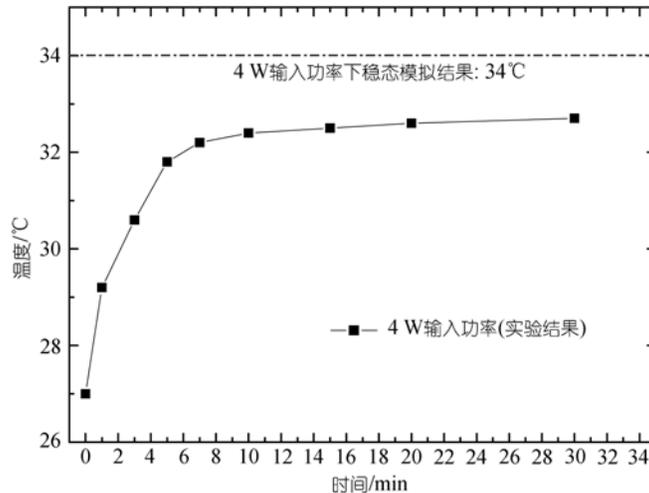


图 11 数值模拟的芯片表面温度与实验测量芯片表面温度比较

图 12(a)和图 12(b)分别显示了图 11 工况下微喷器件的模拟温度分布和速度分布. 图 12(a)中, 4 个芯片表面温度最高, 达到 34°C . 图 12(b)显示了微喷器件内部速度分布情况, 计算结果表明: 微喷器件的流动阻力为 23551 Pa , 被水带走的热量为 3.18 W , 上腔体固体表面温度与内部流体温度差大约为 3 K 左右, 上腔体与水接触面积大约为 $(256e-6)\text{ m}^2$, 由公式 $Q = \alpha F \Delta t$ 可以估计上述微腔体内的换热系数

$$\alpha = \frac{Q}{F \Delta t} = \frac{3.18\text{ W}}{(256e-6 \times 3)\text{ m}^2 \cdot \text{K}} = 4140.6\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

值得说明的是, 实际 4 个芯片的电输入功率为 4 W , 该功率大约 20% 左右转化为光能, 剩下 80% 转化为热, 这样输入 4 W 的电功将产生 3.2 W 的热量. 通过上述模拟结果发现, 这 3.2 W 热量有 3.18 W 被水带走, 剩下 0.02 W 将在腔体壳表面和芯片上部通过自然对流散走. 从图 12(b)和上述分析可以看出, 由于微喷上部腔体高度设计不合理, 射流在上腔内的水阻力较大, 无法有效地直接冲击 LED 芯片的下基板, 这将大大降低冲击射流效率, 虽然如此, 但是微喷射流对微喷器件内上腔体的流动形成强烈扰动, 因此即使射流没有直接冲击 LED 芯片基板, 它的换热效果仍然不错. 但无论如何, 设计的实验系统中的微喷器件需要详细的参数优化以实现射流直接冲击芯片基板, 这样可以获取最大的换热效果.

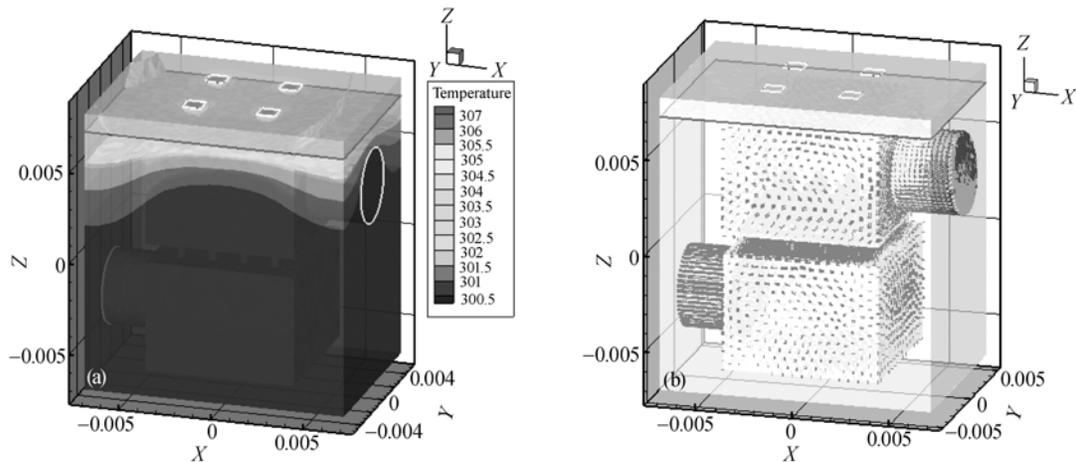


图 12 微喷器件的模拟温度分布和速度分布

(a) 微喷器件温度分布; (b) 微喷器件内速度分布

6 总结

本文提出了一种基于微喷射流冷却的封闭系统, 该系统可用于高亮度 LED 芯片组的散热和封装. 对该系统开展了系统实验和初步数值研究, 主要结论和总结为:

1) 对比实验表明该系统具有良好的散热能力, 能有效地将 LED 芯片组的工作温度下降. 在不采用微喷射流散热系统和依靠自然对流散热的情形下, 对 2×2 LED 芯片组输入 16.4 W 的输入功率, 运行 10 min 后, 芯片表面测量平均温度为 112.2°C , 但采用本方案后芯片表面温度仅仅为 44.2°C ;

2) 系统运行的流量越大效果越好, 但同时也增加了运行成本, 微泵的可靠性和性能对本系统影响非常大;

3) 对设计的实验系统的初步数值模拟发现, 在 2×2 芯片组输入 4 W 功率的情形下, 稳态数值计算下芯片表面平均温度为 34°C , 与接近稳态实验测得的 32.8°C 相近, 这一对比表明数值计算模型可以作为系统进一步参数优化和分析的工具;

4) 模拟结果表明, 实验用微喷器件在 10 mL/s 的流量下的流动阻力为 23551 Pa , 对流换热系数为 $4140.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$;

5) 系统特别是微喷器件的参数优化和模拟设计及长时间可靠性测试需要进一步开展。

致谢 感谢陈明祥博士, 马泽涛硕士和甘志银副教授在实验中给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Zukauskas A, Shur M S, Gaska R. Introduction to Solid-State Lighting. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002. 21—29
- 2 Alan M. Solid state lighting—a world of expanding opportunities at LED 2002. III-Vs Review, 2003, 16(1): 30—33
- 3 Narendran N, Gu Y M. Life of LED-Based white light sources. IEEE J Disp Tech, 2005, 1(1): 167—171[DOI]
- 4 Arik M, Weaver S. Chip scale thermal management of high brightness LED packages. In: Fourth International Conference on Solid State Lighting Proceedings of the SPIE, Vol 5530. USA: SPIE, 2004. 214—223
- 5 Sano S, Murata H, Hattori K. Development of flat panel LED module with heat sink. Mitsubishi Cable Ind Rev, 1993, 86: 112—118
- 6 Petroski J. Understanding longitudinal fin heat sink orientation sensitivity for Light Emitting Diode (LED) lighting applications. In: Proc International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition. Maui, Hawaii: IEEE, 2003. 111—117
- 7 Chen J H, Liu C K, Chao Y L, et al. Cooling performance of silicon-based thermoelectric device on high power LED. In: Proc 24th International Conference on thermoelectrics. USA: University of Clemson, 2005. 53—56
- 8 Hsu C C, Wang S J, Liu C Y. Metallic wafer and chip bonding for LED packaging. In: Proc 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Vol 1. Taipei: IEEE, 2003. 26
- 9 Zhang K, Xiao G W, Wong C K Y, et al. Study on thermal interface material with carbon nanotubes and carbon black in high-brightness LED packaging with flip-chip. In: Proc 55th Electronic Components and Technology. Orlando: IEEE, 2005. 60—65
- 10 Acikalin T, Garimella S V, Petroski J, et al. Optimal design of miniature piezoelectric fans for cooling light emitting diodes. In: Proc Ninth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Vol 1. New York: IEEE, 2004. 663—671
- 11 吴惠颖, 钱可元, 胡飞, 等. 倒装大功率白光 LED 热场分析与测试. 光电子激光, 2005, 16(5): 511—514
- 12 余彬海, 李绪锋. 倒装芯片衬底粘接材料对大功率 LED 热特性的影响. 半导体技术, 2005, 30(6): 49—51, 55
- 13 陈颖, 宋贤杰. 热阻抗模型在高功率 LED 设计中的应用. 中国照明电器, 2005, (7): 5—7
- 14 马春雷, 鲍超. 一种高功率 LED 热阻的测试方法. 光学仪器, 2005, 27(2): 13—17
- 15 王玉田, 史锦珊, 王莉田. 结型 LED 的热特性分析与工程设计. 半导体光电, 1994, 15(2): 143—146
- 16 Wu S, Mai J, Tai Y C, et al. Micro heat exchanger by using MEMS impinging jets. In: Proc Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Orlando: IEEE, 1999. 171—176
- 17 Fleischer A S, Nejad S R. Jet impingement cooling of a discretely heated portion of a protruding pedestal with a single round air jet. Exp Therm and Fluid Sci, 2004, 28: 893—901[DOI]