

详解微热管技术在 LED 散热问题中的应用

相对传统光源，LED 具有的技术优点还包括长寿命、响应快、潜在高光效、体积小以及窄光谱等优点。但究其本质，在这众多的优点中，潜在的高光效、体积小和窄光谱这三点最为关键，这使得 LED 有别于传统光源，并拓宽了它在多种领域的应用。但是也正是由于其体积小、高光效的特点，使得 LED 仍存在应用的障碍——散热问题。依照目前的半导体制造技术，大功率 LED 只能将约 15% 的输入功率转化为光能，而其余 85% 转化成了热能。如果没有良好的散热方法，芯片的热量散不出去，将使芯片失效。

散热成 LED 开发必须解决难题

如果 LED 芯片的热量不能散出去，会加速芯片的老化，还可能导致焊锡的融化，使芯片失效。



LED 发光是靠电子在能带间跃迁产生的，其光谱中不含红外光，LED 的热量不能靠辐射散出，因此 LED 被称为冷光源。LED 一般采用环氧树脂封装，环氧树脂的导热能力非常差，热量只能靠芯片下面的引脚散出。传统亮度的 LED 因为发光功率小，热量也不大，故没有散热问题。而功率型 LED 用在照明上需要将多颗 LED 组成光源模块以达到所需的光通量。对于大功率器件来说，其输入功率 $\geq 1W$ ，而芯片尺寸则为 $1mm \times 1mm \sim 2.5mm \times 2.5mm$ 之间，芯片的功率密度很大，因此必须在较小的 LED 封装中处理极高的热量。目前 LED 的取光效率仅能达到 10%~20%，还有 80%~90% 的能量转换成了热能。如果 LED 芯片的热量不能散出去，会加速芯片的老化，还可能导致焊锡的融化，使芯片失效，具体表现为：

一是发光强度降低。随着芯片结温的升高，芯片的发光效率也会随之降低，芯片结温越高，发光强度下降越快。

二是发光主波长偏移，致使光转换效率下降。

三是加速 LED 的光衰，严重降低 LED 的寿命。

所以，功率型 LED 芯片散热问题成为当前 LED 技术在照明工程中应用的障碍。

为保证功率型 LED 的正常工作，需通过有效的散热设计，保证 LED 的工作结温在允许温度范围内。散热能力越强，结温越低。

LED 照明系统的散热问题主要有两个方面：一是 LED 功率芯片内的散热(导热)，涉及到器件的封装技术；二是 LED 功率芯片的外部散热，主要涉及基板导热、翅片散热器及其与环境空气的对流换热。目前，在解决功率型 LED 照明系统的散热问题上主要采用的方法有：调整 LED 的间距、自然对流散热、加装风扇或是水冷强制散热、热管和回路热管散热等。

在现今 LED 集成高密度，产热量高热流量的发展趋势下，借助热管的高效输热来实现快速散热就变得非常必要。另外，现有散热装置强调热传导环节、忽视对流散热环节，尽管众多的厂家考虑了各种各样的措施来改善热传导环节：如采用热管、加导热硅脂等，却没有意识到热量最终还是要依靠灯具的外表面带走，忽视了传热的均衡性，如果翅片的温度分布严重不均匀，将会导致其中部分翅片(温度较低的部分)效率大大降低。现有针对 LED 照明的散热装置仍局限于功率较低 LED 照明元件，并且效果不明显，成本高，不易应用于实际生产。

内外部散热相互作用决定 LED 散热性能

用于加快芯片热量散发的方法包括采用倒装焊、使用导热性能良好的粘接材料、使用散热器等。

LED 散热技术主要包括两个方面：一是 LED 功率芯片的内部传热，涉及器件的封装技术，因为封装必然产生内部热阻，这个热阻的大小决定了结温与金属底座(支架)的温差(在给定功率条件下)；二是 LED 功率芯片的外部散热，也就是 LED 产生的热最终必然要散发到空气中去，需要基板导热、翅片散热器及其与环境空气的对流换热。外部散热与内部散热相互作用决定了 LED 照明器具的散热性能。

对于 LED 功率芯片的内部传热，增强功率型 LED 散热能力的核心目标是降低 LED 结温，一般要控制在 85℃ 以下。

LED 功率芯片的内部传热主要是从 LED 内部热阻计算入手来进一步探讨和改进 LED 封装技术。LED 作为半导体器件，主要以结温和内部热阻来体现它的热学特性。

在 LED 芯片的制作与封装方面,用于加快芯片热量散发的方法包括采用倒装焊、使用导热性能良好的粘接材料、使用散热器等。

倒装焊芯片(flip-chip)结构的出现很大提高了功率型 LED 的散热能力和出光效率。

无论采用哪种焊接方式,芯片都需通过粘接材料粘接到金属热沉上,所以粘接材料不仅要热导率更高,更要厚度小才能显著降低倒装焊 LED 的热阻,提高器件的散热能力。近年来封装结构良好的功率型 LED 元件,其总热阻已经降为 $6^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

对于 LED 功率芯片的外部散热,目前常用电子器件的散热技术按从热沉带走热量的方式分为自然风冷、强制风冷、强制液冷。

由于 LED 散热的特殊性(高价值、维护成本高、工作时间长、防护等级高等),目前 LED 通过热沉散热的主要方式最可靠的是自然风冷。但由于自然风冷的换热系数较低,为了满足大功率 LED 的散热,通常只能通过加大与空气换热的热沉表面积(翅片面积)来实现换热量的提高。另外由于电子器件的温度不高,无论使用何种表面材料(辐射率最高为接近于 1),辐射散热在相对好的自然散热模组中最大不会超过总换热量的 10%左右,且技术相对单一且成熟,在此不讨论。

从理论上讲,如果使用每颗功率较低的分散 LED 且每颗 LED 热沉的散热面积足够大,则 LED 照明系统的散热就不成为技术问题。但由此会产生 LED 的重量、配光、造型等各方面的实际问题,因此,对于超大功率 LED(尤其是聚光灯、工矿灯及大功率路灯),散热就成为了 LED 照明系统的主要技术问题。

当不考虑 LED 内部热阻时,一个有效的 LED 外部散热器(或称散热模组)需要解决三个层次的传热问题:一是要将大功率集中发热体(高热流密度)的热量通过基座低热阻有效吸收与扩散形成相对低热流密度的热量;二是将相对低热流密度的热量能尽可能有效地传输到散热模组的本体,使得本体表面温度尽可能均匀一致(使得翅片效率接近于 1);三是散热模组的自然空气对流散热要优化。

针对第一个传热问题,传统上低热阻有效吸收与扩散高热流密度发热体热量的最简单方法就是利用高导热材料如铜、铝材料做基材(支架或热沉基座),但当热流密度较高时,发热体中心热量还是很难有效扩散开来,造成中心部温度过高。对于超大功率的集成 LED 光源,传统的金属导热无法解决其中心温度过高的难题。针对第二个传热问题,目前最通常的办法是采用铝翅片来实现模组本体内部的导热。很显然,为了达到翅片有效导热(高翅片效率),铝翅片的厚度要求厚,使得高度受到很大的限制(过高翅片效率降低),造成散热模组的重量大,单位重量的散热量小,最关键的是无法解决集成光源中心部位温度过高的难题。因此,近年来发展出了 VC(蒸汽腔,又名均温板,最初主要用于 CPU 的散热)、微槽群蒸发器、热柱等来替代支架、热沉本体导热的相变技术及其功能性传热器件。针对第三个问题,目前对于全翅片式散热器(主要用于分散光源),可采用小模块组合式解决整体式模组中心部位散热不利的问题。而用于超大功率或者集中光源的散热

模组，目前采用 VC、微槽群蒸发器、热柱等散热模组都没有或者很难实现理想的空气对流模式。

微热管可实现传热强化

微细热管与常规热管最大区别在于微热管内单位蒸汽流量的壁面比表面积提高，因而可实现传热的强化。

出于为电子器件冷却的目的，Cotter 在 1984 年提出“微型热管”的概念以来，微型热管的结构经历了重力型、具有毛细芯的单根热管，到具有一簇平行独立微槽道的平板热管，进而发展到内部槽道簇之间通过蒸汽空间相互连通的形式。近十几年来，用于冷却电子元件的微热管技术得到了很大的发展，国内外有许多学者进行了研究。但至今没有成熟的技术与产业化产品。

从传热观点看，微细热管与常规热管最大的区别在于微热管内单位蒸汽流量的壁面比表面积大大提高，因而可以实现传热的强化。平板微热管阵列 (micro-heatpipe array)，即将多个同时形成的、彼此完全独立的微细热管组合在一起(而不仅仅是微通道阵列热管)，各个微细热管间不连通，且每个微热管内表面可带有微槽群等强化换热的微结构。这样的平板微热管阵列与现有的平板热管和单根微热管相比，特点在于：第一，多根微热管并联解决了微热管由于微尺度造成的热输运能力小的问题；第二，内部的结构使得相变换热面积大大增加。因为微热管之间的铝质壁面具有很好的导热性能，能够将加热面的部分热量传导到与其相对的微槽面上，在整个微热管的周面都有相变发生。无论蒸发段还是冷凝段，单位蒸汽流通量的散热能力得到极大强化。第三，微细热管之间的间壁在结构上起到了“加强筋”的作用，大大增强了平板微热管阵列的承压能力。第四，平板微热管阵列的外形扁平，能够方便地与换热面贴合，克服了常规圆形截面的重力热管需要增加特殊结构才能与换热面紧密贴合的缺点，减小了界面接触热阻。

平板微热管阵列材料为铝合金，宽度、长度、厚度可任意调整，内部有一定数量和尺寸相同的、并排排列彼此独立的微细热管，每个微热管内有微槽群结构。这种结构使得平板微热管阵列具有很高的可靠性，即使出现其中某个微热管损坏的情况，其他独立的微热管仍然可以正常工作，因此平板微热管阵列的可靠性远远高于连通结构热管的可靠性。

平板微热管阵列是种具有超导热性能的导热元件，其表观热传导率是同样金属材质热传导率的 5000 倍以上，是具有同样断面积的传统圆形热管的换热能力的 10 倍。利用平板微热管阵列技术，每平米为 200~400 根，独立运行的微热管是高传热性、高可靠性；微热管阵列应具有承压能力强、能够与换热表面很好贴合、热输运能力强、性价比高等特点。能够解决目前电子芯片散热、LED 灯散热等领域内高热流密度的散热问题。

微热管阵列具有高效吸热性

微热管阵列因为同时具有高效吸热、传输及高效放热特性，因此可以基本解决各种 LED 的散热难题。

热管的性能表现评价方法主要是测量热管沿轴向的温度均匀性。热管的响应时间则取决于其材料(包括金属材料及工质)的热容。为了评价制作的平板微热管阵列,用 50cm 长的热管进行了均温性及热响应时间的测试。实验时在热管垂直方向布置 4 根 T 型热电偶,分别位于热管的蒸发段、绝热段和冷凝段。

实验数据表明,平板微热管阵列具有很好的均温性。从蒸发段到冷凝段的温度差在 1℃ 以内,热响应时间在 80s 以内。

通过对基于平板微热管阵列的功率型 LED 照明装置的几种不同组合形式进行试验测试,分析了平板微热管阵列与散热器的接触面积、微热管阵列热运输长度、接触热阻对基于平板微热管阵列的功率型 LED 照明散热装置的影响,包括管板接触面积对装置的传热影响、接触热阻对平板微热管阵列 LED 传热装置的传热影响和 U 形平板微热管阵列的 LED 照明散热装置的性能。

微热管可以随意组合成一定宽度的平板微热管阵列,且微热管可以任意弯折,且传热效果在较低的热流密度下无明显变化。U 形微热管阵列是一种由实验证明传热性能良好的微热管阵列的弯折形式。

微热管阵列因为同时具有高效吸热、传输及高效放热特性,且可柔性变形与翅片结合,因此可以基本解决各种 LED 的散热难题。其特点如下:

一是微热管阵列的蒸发换热部的最大换热能力可达到 200W/cm;

二是高热传导率:是实心铝材的 5000 倍以上;

三是高可靠性:由于平板内的每根微热管独立工作,即使有一两根微热管破坏,其他微热管照样在发挥作用而不至于影响使用。况且,其承压能力是传统圆形热管的 10 倍以上,根本就很难发生机械性破坏;

四是高等温性:每米温差小于 1℃,几乎可以被认为是一个等温体;

五是大面积接触:由于微热管阵列的放热面积大,可实现铝翅片、基板及热管的温度基本一致,几乎完全消除了“翅片效应”。

几种散热方式比较

散热方式	特点	效果	重量	成本
单一翅片式	纯导热,温差极大,产生翅片效应;径向散热衰减。	差	重	低
传统圆热管翅片式	接触面小,热运输能力差	小功率一般,大功率较差	较轻	较高
均温板(VC)翅片式	只能小面积均温,热无法运输	无法传输,整体效果较差	重	很高
脉动热管式(日本技术,已停止生产)	自励振荡式,温差大,可倒置	整体效果一般,可靠性差,管径细	一般	高
微槽群相变换热器、热柱	单一蒸汽腔,可靠性较差	散热模组效果一般,容易失效	一般	高
微热管阵列翅片式	既均温,又高效传输,且可靠性高	整体效果最佳		