



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

分类号 \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号 \_\_\_\_\_

桂林电子科技大学  
硕士学位论文

题目：高功率 LED 照明系统热设计与热-机械可靠性分析

(英文) **The Thermal Design and Thermal -Mechanical Reliability  
Analysis of High Power LED Lighting System**

研究生姓名：王教品

指导教师姓名、职务：潘开林教授

申请学位门类：工学硕士

学科、专业：机械电子工程

提交论文日期：2011 年 4 月

论文答辩日期：2011 年 6 月

## 独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其它人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得桂林电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名：

日期：

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解桂林电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属桂林电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署名单位仍然为桂林电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密的论文在解密后遵守此规定）

本人签名：

日期：

导师签名：

日期：

## 摘要

随着半导体照明技术的发展, LED 由于其节能、环保、寿命长等优点已经慢慢向普通照明领域发展。但是 LED 低的光转换效率(10%~20%)使其大部分能量转换成了热能,造成 LED 结温过高,可靠性降低。因此,增强 LED 系统的散热性能和提高其热-机械可靠性是 LED 光源进入普通照明领域的关键。本文主要针对目前市场上的大部分高功率 LED 产品还存在着 LED 结温偏高,可靠性较差,性价比低(成本高)等一系列问题,开展了对单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统及高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的热设计和热-机械可靠性分析。

首先,在分析国内外现有高功率LED的热设计及其封装技术的基础上,抽象LED的热模型。运用T3Ster瞬态热阻测试仪对高功率LED照明系统中的扩散热阻进行实验分析并同时测量相关热特性参数。由扩散热阻实验分析得出:合理地增加LED器件与散热翅片的有效接触面积及选择最优的安装位置可以有效降低系统的扩散热阻,提高散热翅片的散热效率。

其次,依据 LED 封装的热特性与光特性要求,结合实验分析的结果及测量的相关热特性参数对单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统及高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统进行热结构设计及材料参数优化,并运用热阻网络模型对这两种封装结构的热阻及结温进行计算分析。运用热阻网络模型计算求得的系统热阻与结温分别为(12.48 K/W、74.92℃)和(2.214 K/W、67.066℃)。

然后,用 ANSYS 软件对单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统的温度场分布、热应力场进行仿真计算模拟。通过仿真分析,单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统的热阻为 12.15K/W,结温为 73.602℃,与热阻网络模型计算所得到的热阻(12.42 K/W)和结温(74.68℃)非常接近,这也直接验证了热阻网络模型计算的准确性。在热应力分析中发现,LED 芯片处存在比较大的热应力,并且最大热应力通常存在于芯片的边角处,这极易产生分层与翘曲。最后应用正交试验设计探讨了不同材料参数组合对 LED 芯片应力的影响,对高功率 LED 器件的材料参数进行了优化,得出的最优组合方案为:芯片衬底材料为 SiC、芯片键合层材料为 Sn63Pb37、热沉材料为 AlN。

最后,对高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的稳态温度场分布进行模拟分析并对其系统散热结构进行优化。通过仿真分析,高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的热阻与结温(2.406K/W、70.717℃)与热阻网络模型计算所得的值(2.214 K/W、67.066℃)非常接近。在综合考虑各方面因素的同时,通过正交试验设计对系统结构参数进行了优化,主要考虑各参数对系统结温产生的影响,得出了一组最优的参数组合方案,即当 LED 芯片衬底为 Si,键合层材料为 Sn63Pb37,厚度为 0.02mm,翅片

高度为 70mm，翅片宽度为 17.535mm，翅片个数为 60，中心柱高度为 15mm 时，系统结构的散热性能最好，可靠性最高。

**关键字：**高功率 LED 照明系统 扩散热阻 热阻网络模型 热设计 热-机械可靠性



## Abstract

As solid state-lighting (SSL) technology advances, high power light emitting diodes (LED) are penetrating into illumination applications due to their low energy consumption, environmental-friendly and long lifetime characteristics. However, the low-light conversion efficiency (10%~20%) causes most of the energy to transform and generate redundant heat which ultimately increases the junction temperature and reduces reliability. Therefore, improving the system's ability to draw heat away from the LED junction is the critical point to promote the LED light source in general lighting applications. This paper carried out thermal design and thermal-mechanical reliability analysis on high power LED device array packaging system and high power multi-chip LED packaging system, which mainly aims at a series of problems existed in most of high power LED products, such as high junction temperature, low reliability, high cost, and so on.

Firstly. Based on analyzing the thermal design and packaging technology of the existing high power LED at home and abroad, the thermal model of LED is abstracted. The experimental analysis on the spreading resistances of the high power LED lighting system and the measuring of the related thermal characteristic parameters are implemented by T3Ster. From the experimental analysis of the spreading resistances, we can obtain that increasing the effective contact area between the LED devices and radiating fins and selecting the optimal mounting position can decrease the spreading resistances and increase the cooling efficiency of heat sink effectively.

Secondly, according to the requirements of the thermal and optical performance of the LED packaging, the thermal structure design and material parameters optimization of the high power LED device array packaging system and high power multi-chip LED packaging system are carried out based on the results of the experimental analysis and the thermal characteristic parameters. Then, the thermal resistance and junction temperature of these two high power LED packaging systems are calculated and analyzed by using the thermal resistance network model. The results show that the thermal resistance and the junction temperature of these two systems are (12.48 K/W、74.92°C) and (2.214 K/W、67.066°C), respectively.

Thirdly, the distribution of the temperature field and the thermal stress field of the high power LED device array packaging system are simulated by ANSYS. Through the simulation, we can obtain that the thermal resistance and the junction temperature of the high power LED device array packaging system are 12.15K/W and 73.602°C respectively, which are close to the results that are calculated by the thermal resistance network model.

During the thermal stress analysis, it can be found that the high thermo-mechanical stress exists in the edge and corner of the chip which lead to delaminate and warp easily. In order to investigate the main parameters leading to excessive stress in the LED chip and optimize the material parameters of the LED device, DOE simulation is performed. The optimal parameters for LED device are acquired: chip substrate (SiC), die-attach (Sn63Pb37), submount (AlN).

Finally, the simulation of the distribution of steady state temperature field and the optimization of the cooling structure of the system are carried out for the high power multi-chip LED packaging system. Through the simulation, the thermal resistance ( 2.406K/W) and the junction temperature (70.717°C) of the high power multi-chip LED packaging system are close to the results that are calculated by the thermal resistance network model. In order to investigate the main parameters leading to excessive junction temperature of the LED chip and optimize the structure parameters of the system, DOE simulation is performed. The optimal parameters for system are acquired: when the substrate of LED chip and the material of die-attach are used Si and Sn63Pb37 respectively, the thickness of bonding layer is 0.02mm, the height of the fins is 70mm, the with of the fins is 17.535mm, the number of the fins is 60, and the thickness of the central column is 15mm, the heat dissipation performance and the reliability of the system are the best.

**Keywords:** high power LED lighting system, spreading resistances, thermal resistance network model, thermal design, thermal -mechanical reliability

## 目录

摘要 .....	I
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>第一章 绪论</b> .....	<b>- 1 -</b>
§1.1 概述 .....	- 1 -
§1.1.1 LED 内部热量的产生 .....	- 1 -
§1.1.2 LED 结温 .....	- 2 -
§1.2 国内外研究现状 .....	- 2 -
§1.2.1 国外研究现状 .....	- 3 -
§1.2.2 国内研究现状 .....	- 5 -
§1.3 课题研究的背景和意义 .....	- 5 -
§1.4 论文研究内容与思路 .....	- 8 -
<b>第二章 照明用高功率 LED 封装热管理技术研究</b> .....	<b>- 10 -</b>
§2.1 高功率 LED 芯片级热管理技术 .....	- 10 -
§2.2 高功率 LED 器件级热管理技术 .....	- 12 -
§2.2.1 高功率 LED 单芯片封装结构 .....	- 12 -
§2.2.2 高功率 LED 多芯片封装结构 .....	- 12 -
§2.2.3 晶圆级 LED 阵列封装结构 .....	- 13 -
§2.3 高功率 LED 板级热管理技术 .....	- 13 -
§2.3.1 高功率 LED 封装基板材料 .....	- 13 -
§2.3.2 高功率 LED 器件阵列封装结构 .....	- 14 -
§2.3.3 COB 封装结构 .....	- 15 -
§2.4 高功率 LED 系统级热管理技术 .....	- 15 -
§2.4.1 高功率 LED 系统封装技术 (SiP-LED) .....	- 15 -
§2.4.2 高功率 LED 系统散热器结构 .....	- 15 -
§2.5 本章小结 .....	- 17 -
<b>第三章 高功率 LED 照明系统热结构设计</b> .....	<b>- 18 -</b>
§3.1 传热的基本原理 .....	- 18 -
§3.1.1 传热的基本方式 .....	- 18 -
§3.1.2 热阻网络 .....	- 19 -
§3.2 高功率 LED 照明系统扩散热阻研究 .....	- 21 -
§3.2.1 扩散热阻原理 .....	- 21 -

§3.2.2 扩散热阻实验分析 .....	- 22 -
§3.3 单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统热设计 .....	- 26 -
§3.3.1 单芯片高功率 LED 器件的热工模型优化 .....	- 27 -
§3.3.2 散热基板材料的选择 .....	- 28 -
§3.3.3 单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装结构 .....	- 29 -
§3.4 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统热设计 .....	- 31 -
§3.4.1 多芯片高功率 LED 发光组件 (MCM-LED) 的热工模型 .....	- 31 -
§3.4.2 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统散热器设计 .....	- 32 -
§3.5 本章小结 .....	- 34 -
<b>第四章 高功率 LED 照明系统的有限元仿真分析及其参数优化 .....</b>	<b>- 35 -</b>
§4.1 ANSYS 稳态热分析及其热应力分析 .....	- 35 -
§4.1.1 稳态热分析 .....	- 35 -
§4.1.2 热应力分析 .....	- 35 -
§4.2 单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统热应力分析 .....	- 35 -
§4.2.1 稳态热分析 .....	- 36 -
§4.2.2 热应力分析 .....	- 38 -
§4.3 单芯片高功率 LED 器件热-机械材料参数优化 .....	- 41 -
§4.3.1 基于正交表的单芯片高功率 LED 器件材料参数组合设计 .....	- 41 -
§4.3.2 试验结果处理与分析 .....	- 42 -
§4.4 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统热仿真分析 .....	- 44 -
§4.5 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统散热结构参数优化 .....	- 46 -
§4.5.1 芯片衬底的优化 .....	- 46 -
§4.5.2 芯片键合层的优化 .....	- 46 -
§4.5.3 系统外部散热器结构参数优化 .....	- 47 -
§4.6 本章小结 .....	- 50 -
<b>第五章 全文总结 .....</b>	<b>- 52 -</b>
§5.1 结论 .....	- 52 -
§5.2 展望 .....	- 53 -
参考文献 .....	- 54 -
致谢 .....	- 54 -
作者在攻读硕士期间主要研究成果 .....	- 54 -

# 第一章 绪论

## § 1.1 概述

“节能环保”是人类的未来，也是我国“十二五”规划的核心。随着科技的发展，全球性的能源短缺和环境污染问题日益突出，作为固态照明光源的 LED 发光二极管，具有低耗能、低排放、发光效率高、寿命长等一系列特性，是一种环保、节能、高效的新型发光器件，真正点燃了“绿色照明”的光辉，被认为是 21 世纪最有价值的新光源，将成为国家节能减排目标中的战略新兴产业。

### § 1.1.1 LED 内部热量的产生

从 1962 年第一个具有实际意义且能发出可见光的半导体发光二极管（Light Emitting Diode LED）诞生至今已快接近 50 年。每只 LED 的发光效率从开始的不到 0.1lm/W 发展到现在的每只超过 100lm/W，甚至更高（其发光效率的发展趋势如图 1.1 所示<sup>[1]</sup>）。高功率 LED 的应用已经开始由特种照明市场领域，逐步向普通照明市场迈进。但是 LED 低的光转换效率（10%~20%）使其大部分能量转换成了热能，造成 LED 结温过高，可靠性降低<sup>[2,3]</sup>。随着 LED 照明对光通量的要求越来越高，芯片上输入的功率也越来越大，目前芯片的功率密度已经超过 100W/cm<sup>2</sup>，这必然会产生很大的热量，因此如何控制芯片产生的热量已经成为高功率 LED 热设计与热管理亟待解决的问题。

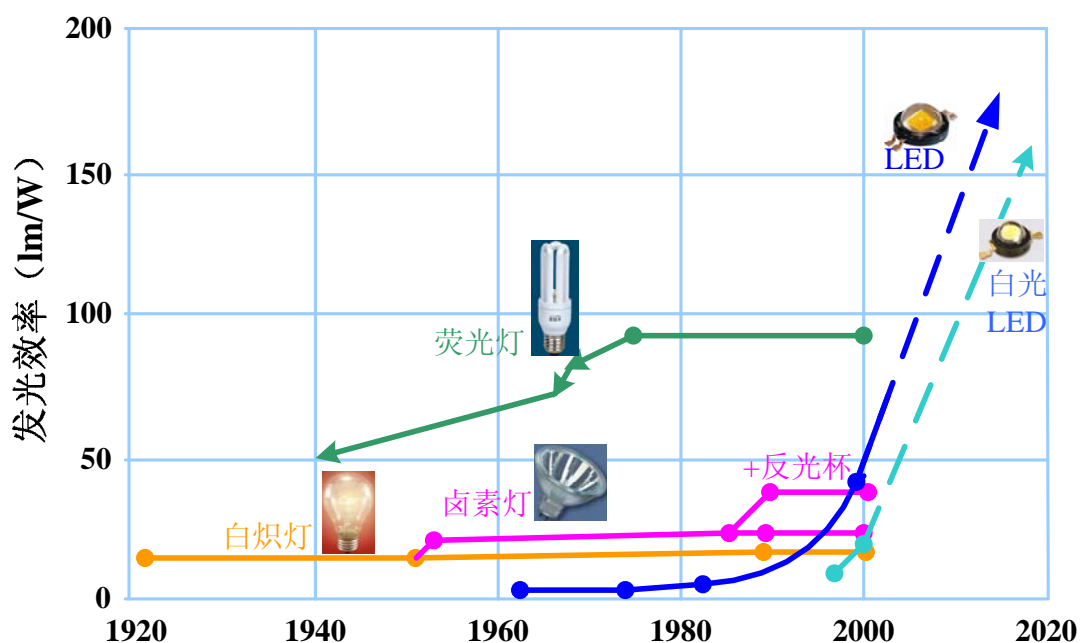


图 1.1 照明光源发光效率的发展趋势

LED 芯片在发光时产生热量的多少主要取决于量子效率的大小。LED 内部分为 P 区和 N 区，P 区和 N 区的交界处形成 PN 结，它可以通过 LED 的电流使 PN 结发光<sup>[4]</sup>，其发光原理如图 1.2 所示。电子与空穴只有在发光中心复合才能发光，但由于 LED 的 PN 结存在材料品质缺陷、位错等因素，会产生晶格散射、杂质电离等问题，造成电子与晶格原子结合产生点阵振动而发生无辐射跃迁，这部分能量就会转换成热能损耗在 PN 结内<sup>[5]</sup>。因此发光复合量占的比例越大，光量子效率就越高(即发光效率就越高)，同时，产生的热量也越少。

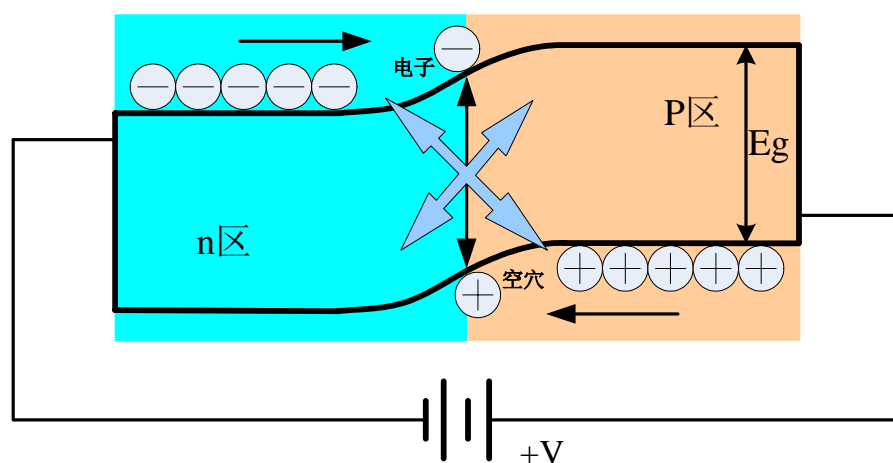


图 1.2 LED 发光原理图

### § 1.1.2 LED 结温

LED 结温主要指的是芯片 PN 结的温度，但由于芯片的尺寸很小，通常也把 LED 芯片的整体温度定义成结温。LED 结温的高低对 LED 性能将会产生很大的影响，如发光效率降低、寿命下降、光色漂移、可靠性降低等<sup>[6,7,8]</sup>。因此在 LED 应用时（特别是高功率 LED）要特别注意控制其结温，使其保持在允许范围内，避免 LED 性能下降和失效的发生。

造成 LED 结温上升的因素很多，目前由于发光效率低造成过多的能量转化为热能是导致 LED 结温上升的主要原因。而 LED 器件封装材料的热传导率及其外部散热结构的散热性能也是影响结温高低的重要原因，器件封装材料热传导率低及散热器散热性能差会造成 LED 系统热阻过大，不能把热量有效地耗散出去，导致 LED 结温上升。

## § 1.2 国内外研究现状

LED 因具有发光效率高、寿命长、节能、环保、反应速度快、安全可靠性等诸多优点而被认为是 21 世纪最有价值的新光源，将取代白炽灯和日光灯成为照明市场的主导<sup>[9]</sup>。面对 LED 光源的巨大商机和新一代照明革命的浪潮，许多国家和地区相继推出了

半导体照明发展计划<sup>[10]</sup>，如表 1.1 所示。在国内，水立方、鸟巢两座 LED 建筑照明里程碑的顺利落成预示着 LED 技术在国内的一些重点项目中开始崭露头角，扮演着越来越重要的角色，而 2009 年科技部颁布的“十城万盏”计划（科技部于 2009 年 4 月 30 日正式批复了天津等 21 城市开展半导体照明应用工程）的实施更预示着 LED 照明已经由景观照明走向道路照明，并顺利转向局部批量使用，这为国内 LED 照明由特殊照明走向普通照明奠定了良好的基础。但目前发光效率特别是光提取效率低、散热能力差以及热-机械可靠性低是半导体照明器件即高功率发光二极管（LED）面临的主要技术瓶颈<sup>[11-14]</sup>。因此，如何提高取光效率、散热能力、可靠性以及性价比是 LED 进入普通照明领域亟待解决的关键技术之一。

表 1.1 世界主要国家制定的半导体照明发展计划

国家及地区	计划名称	主要内容
日本	21世纪照明计划	政府投资50亿日元，由13个公司和4所大学联合执行，计划2010年发光效率达到120lm/W，并制定半导体照明灯具的国家标准。
美国	国家半导体照明研究计划	在2000-2010年这10年间，计划投资5亿美元，研究降低成本和提高LED的光电转换效率。
欧盟	彩虹计划	2000年7月制定，主要是推动白光LED应用
韩国	固态照明计划	计划2000-2008年这8年间由政府和企业共同投资12.08亿美元，目标成为亚洲最大光电生产国。

### § 1.2.1 国外研究现状

近年来，针对高功率 LED 的封装散热性能差、可靠性低等难题，世界各大 LED 厂商以及各研究机构加大了对高功率 LED 照明封装技术的研发力度，以提高 LED 器件总的光通量和可靠性，使之达到未来照明的要求。

在高功率 LED 热设计与热管理方面，LumiLeds 公司研制出了 AlGaInN 功率型倒装芯片结构。LED 芯片通过凸点倒装焊接在硅衬底上，这样热量就直接通过凸点传导至热导率更高的硅或陶瓷衬底上，而不必经由热导率低的蓝宝石衬底。由于其有源发热区更接近散热体，这就大大降低了内部热沉热阻<sup>[15]</sup>。对于应用比较广泛的垂直结构 GaN 基 LED 芯片，为了提高芯片的散热性能，LumiLeds 等一些大公司采用芯片衬底剥离技术，剥离蓝宝石生长衬底，键合导热性能高的金属及合金衬底、硅衬底等。这样可以大大提高芯片支持衬底的散热效率<sup>[16]</sup>。

韩国 Myong Ji 大学的 Lan Kim 和 Moo Whan Shin 等人对多芯片 LED 封装器件进行了热特性分析, 他们分别对单芯片 LED 器件、双芯片 LED 器件和 4 芯片 LED 器件进行了热阻测试, 他们发现 LED 器件的总热阻会随着芯片数的增多而减小。该技术能很好地提高 LED 封装器件的热特性和光通量<sup>[17]</sup>。

韩国三星的 Jung Kyu Park 和 Young Sam Park 等人提出了基于 LTCC 和多层金属-陶瓷封装 (MLCMP) 的高功率 LED 封装结构, 该结构采用金属通孔结构热沉作为芯片的散热热沉, 即先在陶瓷上冲孔, 然后填充金属进行烧结。金属热沉的横截面面积远大于芯片的尺寸, 将芯片置于金属通孔热沉上, 这样热量就可以直接通过金属通孔热沉传导到电路基板上, 大大提高了高功率 LED 的散热性能<sup>[18]</sup>。

美国 Lamina Ceramics 公司以低温共烧陶瓷技术为基础自行研制了金属低温共烧陶瓷基板 (LTCC-M)。该技术以陶瓷、金属为基板材料, 将线路印刷于陶瓷基板上, 再把陶瓷基板与金属整合在一起, 最后通过低温烧结而成。适合于共晶焊的高功率 LED 芯片可直接焊接在基板上, 该封装结构简单, 热界面少, 材料导热率高, 大大提高了散热性能, 为高功率 LED 多芯片封装和阵列封装提出了解决方案<sup>[19]</sup>。

美国 GrafTech 的 Matt Getz 等人研制出了一种新型的导热基板, 他们运用导热率高达 500W/mK 的天然石墨材料替代传统金属基印刷电路板 (MCPCB) 中的金属材料。通过实验发现, 石墨基电路板使整体封装结构的总热阻减少了 1.7K/W, 并且质量比金属基电路板也减少了 20% 多<sup>[20]</sup>。

在系统散热方面, John Vetrovec 和 Amardeep Litt 提出了一个高性能的主动散热系统 (AHS), 该系统里面具有封闭的冷却液流通通道, 热量可经由冷却液直接传导到各个翅片中, 因此能达到很低的热阻, 可以大大降低 LED 的结温。同时, AHS 结构简单, 可靠性高, 适合于室内和室外环境应用<sup>[21]</sup>。

美国 Nuventix 公司的 Jim Balthazar 等人针对 LED 灯具设计中被动冷却效果差, 散热器体积大的缺点, 提出了一种名为 Synthetic Jet 的主动散热器, 该散热器采用薄膜的自由振动来加强空气的对流系数, 能很好地降低 LED 灯具的温度。与翅片被动散热和风扇主动散热相比, 该散热器结构紧凑, 可靠性高, 能很好的减小 LED 灯具的封装体积, 提高可靠性<sup>[22]</sup>。

在热-机械可靠性方面, 德国 Curmilk 公司研制出了具有高导热性能的覆铜陶瓷基板, 该基板由陶瓷 (AlN 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 和铜在高温高压下烧结而成, 并且中间没有使用粘结剂, 因此导热性能好, 强度高、绝缘性强。其中氮化铝 (AlN) 的热膨胀系数比较低, 与硅的热膨胀系数相当, 从而降低了封装热应力<sup>[23]</sup>。

Armin Veitl 等人提出了一种名为 CeramCool 的陶瓷散热器, 该 CeramCool 陶瓷散热器是电路板和散热器的一个有效结合, 且陶瓷具有很好的绝缘性和导热性能, LED 器件可直接封装在 CeramCool 上, 且由于陶瓷低的热膨胀系数, 大大减小了热应力和封装热阻, 提高了 LED 的可靠性<sup>[24]</sup>。

## § 1.2.2 国内研究现状

国内相比于欧美等一些国家虽然起步较晚，但最近几年在 LED 封装技术上还是投入了很大的力量，且已经获得了快速的发展。关于这方面的研究主要集中在大学、研究机构以及企业。

在热设计与热管理方面，天津大学化工学院的齐昆、陈旭等人对 LED 封装结构的几种不同的热界面材料进行了温度场仿真分析，经研究发现，低温烧结的纳米银焊膏具有很好的导热性能，能进一步降低 LED 器件的封装热阻<sup>[25]</sup>。

浙江大学的王德苗、苏达等人针对高功率 LED 封装结构散热性能差等问题提出了一种新型的高功率 LED 封装模块。通过将电极层和绝缘介质层以薄膜形式直接制备在铝基板上，减少了高功率 LED 封装结构的热界面数量，降低了封装结构热阻，提高了高功率 LED 封装结构的散热性能<sup>[26]</sup>。

台湾国立虎尾科技大学 (National Formosa University) 的 R.F.Shyu 等人提出了一种新型的硅基板结构，他们通过微机械加工技术在硅基板上制作具有棱锥形结构的凹槽，该凹槽底部是平的，把 LED 芯片直接封装在凹槽内。经实验对比发现，该凹槽减小了硅基板的厚度，提高了整体封装结构的散热性能，并且棱锥行凹槽还能起到聚光作用，在一定程度上提高了取光效率<sup>[27]</sup>。

香港科技大学的李世玮，张荣<sup>[28]</sup>等人提出了一种用于 LED 阵列封装的晶圆级封装方法。在该方法中，LED 芯片阵列被安装在硅晶圆上，该晶圆上预制有凹槽结构，可用做接下来封装过程中环氧树脂流体的阻挡装置。环氧树脂密封剂接着被滴到衬底上，并被固化以完成该封装过程。将晶圆进行切割后可直接得到可用的 LED 器件。该方法制作工艺简单，封装结构热界面数量少，具有很好的散热性能，并且与传统工艺相比，可降低成本和实现高密度封装。

在系统散热方面，华中科技大学的刘胜等人通过在散热器上安装一个微泵浦系统来解决 LED 的散热问题。在封闭系统中，水在微泵浦的作用下进入 LED 的底板小槽吸热，然后又回到小的水容器中，通过风扇与翅片散热。这种微泵浦结构可以将外部热阻降为 0.192K/W，具有极优的散热性能<sup>[29]</sup>。

台湾新强光电公司采用系统封装技术 (SiP)，通过翅片+热管的方式搭配高效能散热模块，研制出了 72W、80W 的高亮度白光 LED 光源。该光源封装热阻较低 (4.38K/W)，可以控制 LED 结温不超过环境温度 40℃，从而确保了 LED 的可靠性和良好的发光性能<sup>[30]</sup>。

## § 1.3 课题研究的背景和意义

LED 照明工程是国家重点推广与积极扶持的国家级节能减排工程，LED 作为一种环保、节能、高效的新型照明光源，点燃了“绿色照明”的光辉，将取代传统照明

光源成为通用照明领域的主导，使照明技术面临一场新的革命，从而一定程度上改善人类的生产和生活方式。与传统照明光源相比，LED 具有如下优点，其典型的性能参数对比如表 1.2 所示<sup>[31]</sup>。

除了上述的优势，LED 照明光源其它的优点还包括<sup>[32]</sup>：

- (1) LED 发光二极管由环氧树脂或硅胶封装，机械结构牢固，耐震动和冲击，不易破碎；
- (2) 光源材料中无汞等重金属，环保，不污染环境；
- (3) 与白炽灯和荧光灯相比，LED 光源器件更小，布局方案灵活、丰富；
- (4) 信号反应时间快，适用于车灯、红绿灯等一些信号光源；
- (5) 能发出各种颜色的可见光，无红外线、紫外线，适合用于景观照明和一些展览大厅照明；
- (6) 颜色可变，亮度可调，可用于制成智能灯具；

表 1.2 LED 光源与传统照明光源各性能参数比较

光源名称	发光效率 (lm/W)	显色指数 (CRI)	色温 (K)	寿命 (kh)
白光 LED	101	70	5500	50
白炽灯	14	100	3300	1
荧光灯	83	78	4100	20
HID	80	65	4000	24

由于 LED 近年来在技术上的不断突破，LED 发光亮度大大提高，并且在器件输入功率上也有很大的提高。目前单芯片 W 级大功率 LED 已产业化并推向市场，这使得超高亮度 LED 的应用开始由特种照明市场领域，逐步向普通照明市场迈进(图 1.3<sup>[33]</sup>为飞利浦照明推出的可取代 40W 白炽灯的 600lm 可调光 A-shape LED 灯泡)。LED 芯片输入功率的不断提高，对其封装技术提出了更高的要求。但目前市场上的大部分 LED 产品还存在着 LED 结温偏高，可靠性差，性价比低（成本高），光、电、色参数会随温度与时间的改变而较大漂移等一系列问题，还无法取代白炽灯和日光灯成为



图 1.3 600lm 可调光 A-shape LED 灯泡(来源:中国半导体照明网)

日常照明领域的主导。图 1.4<sup>[34]</sup>为 LED 器件相对光输出在不同温度下随时间变化关系图，LED 基板温度为 38℃时其发光效率衰减到 70%所需的时间大约为 5 万小时，但当温度上升到 58℃时，不到 1 万小时其结温就已衰减到 70%，这说明 LED 的操作环境温度愈高，其产品寿命愈低。在图中我们还可以看出，当 LED 的基板温度为 38℃时，经过 1 万小时后其相对光输出为 93%左右，但当温度上升到 51℃时，经过 1 万小时后其相对光输出只有 70%左右，这说明 LED 发光效率随温度的上升而急剧下降。

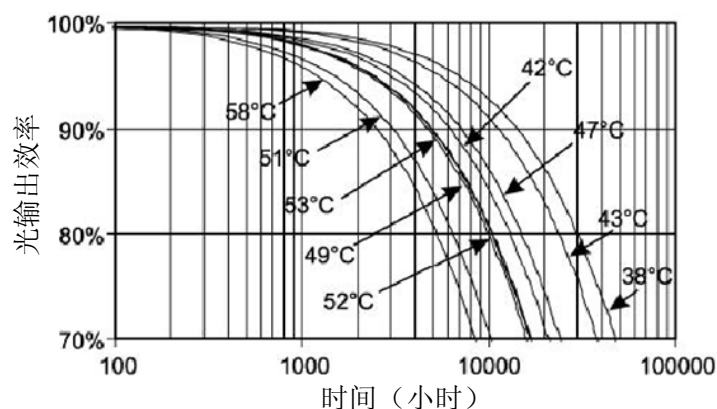


图 1.4 LED 器件相对光输出在不同温度下随时间变化关系图

过多的热量会引起 LED 结温的升高，而 LED 结温上升会引起 LED 光电特性、热-机械性能的恶化（如图 1.5 所示），LED 器件在封装过程和工作过程中由于高温的回流焊和芯片的重复发热，功率模块会不断经历热循环载荷的作用，由于不同材料的热膨胀系数（CTE）不匹配，会产生层间热应力，发生翘曲、裂纹（特别是在芯片键合层和引线键合层处），甚至产生失效和破坏，这会大大影响 LED 器件的电性能和热性能，从而进一步导致 LED 器件光性能的降低，寿命下降<sup>[35]</sup>。因此如何降低 LED 结温以及提高 LED 封装结构的热-机械可靠性是 LED 照明应用的重要关键所在，而 LED 系统的散热管理与热-机械可靠性设计便成为了一重要课题。LED 要作为光源进入普通照明领域，必须比传统光源有更高的发光效率、更好的光学特性、更长的使用寿命和更低的光通量成本，传统 LED 的封装技术已很难达到这些要求，且局部性的改进和优化 LED 器件已很难达到很好的效果，因此要从系统集成的角度去寻求新的封装技术路线和新的封装结构。

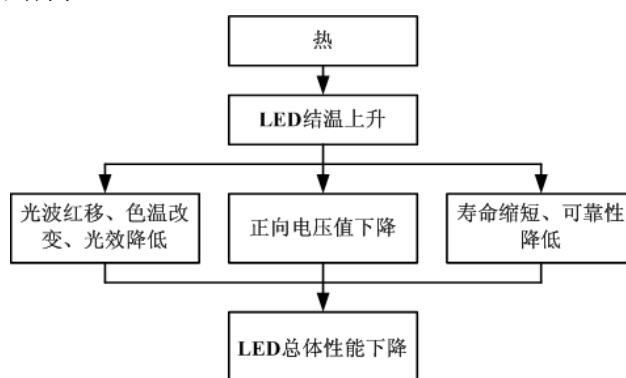


图 1.5 LED 结温上升引起 LED 光电特性和热-机械性能的变化

本课题针对上述背景,提出全新的基于热阻网络模型和温度场、热应力场、建模、仿真及其优化设计的照明用高功率LED系统集成封装技术研究。课题的成功实施将为照明用高功率LED封装技术的发展奠定技术基础。本课题对于解决传统LED封装技术所面临的热特性和可靠性差,性价比低等难题以及促进LED封装技术的研究使之加速进入普通照明领域具有重要意义。课题的顺利开展与实施,无疑将对LED封装技术的研究以及LED在普通照明领域的应用起到重要的推动作用,对于解决当前LED封装技术的生产模式问题以及面对封装产业化的瓶颈问题具有重要工程与学术价值。

#### § 1.4 论文研究内容与思路

本论文研究课题来源于广西自然科学基金项目(2010GXNSFD013039)“照明用LED热设计及系统集成封装技术研究”,课题针对目前市场上的大部分高功率LED产品还存在着LED结温偏高,可靠性较差,性价比低(成本高),光、电、色参数会随温度与时间的改变而较大漂移等一系列问题,在分析国内外现有高功率LED的热设计及其封装技术的基础上,抽象LED的热模型;并借鉴微电子系统封装(SiP)的思路,依据LED封装的热特性与光特性要求,进行高功率LED照明系统热设计(包括材料优化和结构优化设计等)和热-机械可靠性分析,为高功率LED提供一个高热导、高可靠性的封装结构。本论文具体研究思路如图1.6所示。

全文共分为五章,主要研究内容包括了高功率LED照明系统扩散热阻研究,单芯片高功率LED器件阵列组合封装系统及高功率LED多芯片集成阵列封装系统的热设计、热仿真对比分析及其结构参数优化。每章节具体内容安排如下:

第一章首先介绍了LED的结温及其内部热量的产生,同时针对目前市场上高功率LED产品所存在的一系列问题阐述了课题研究的背景和意义,最后在分析高功率LED封装热管理技术国内外研究现状的基础上提出了论文的主要研究内容和研究思路。

第二章主要对照明用高功率LED封装热管理技术进行了研究与分析。照明用高功率LED封装热管理主要分为4个等级:芯片级热管理(0级)、器件级热管理(1级)、板级热管理(2级)以及系统级热管理(3级),每一个等级散热性能的好坏都将会对LED总体性能产生很大的影响,本章主要从这4个等级来对照明用高功率LED封装热管理技术进行研究。

第三章主要进行了单芯片高功率LED器件阵列组合封装系统及高功率LED多芯片集成阵列封装系统的热设计和热管理。首先运用T3Ster瞬态热阻测试仪对高功率LED照明系统中的扩散热阻进行实验分析并同时测量相关热特性参数,接着结合实验分析的结果及测量的相关参数对高功率LED照明系统进行热结构与材料优化,最后运用热阻网络模型对系统的热阻进行理论计算分析。

第四章主要是采用基于有限元理论的大型分析软件 ANSYS 对高功率 LED 照明系统进行热仿真分析与结构优化。首先介绍了稳态热分析和热应力分析的原理及其基本思想；接着对单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统的温度场分布、热应力场进行计算模拟并进行相关的对比分析，同时通过参数设计与正交试验设计，对高功率 LED 器件进行材料参数优化；最后对高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的稳态温度场分布进行模拟仿真分析并通过正交试验设计对其系统散热结构参数进行优化。

第五章是全文工作的总结与展望。

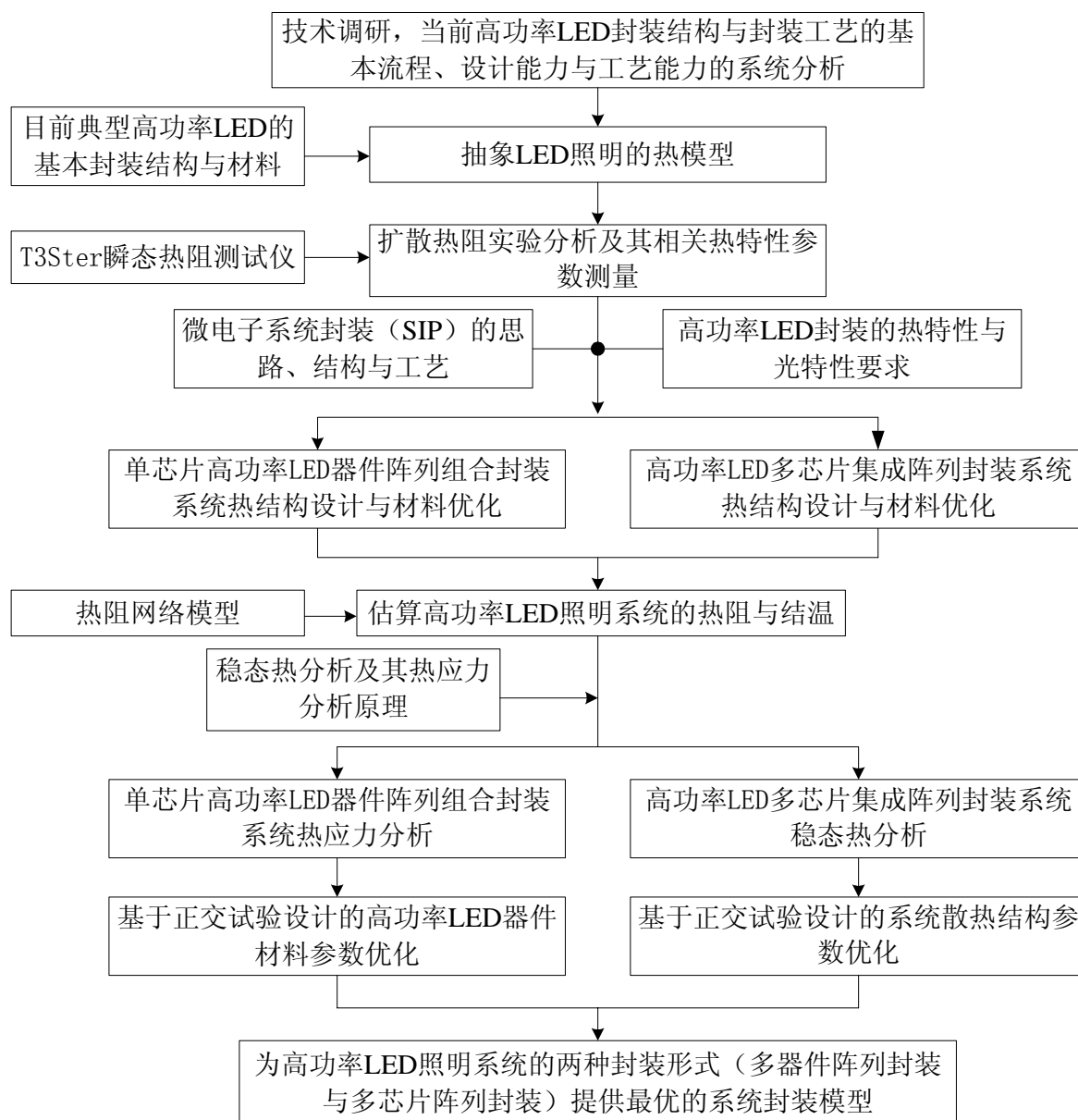


图 1.6 研究思路流程图

## 第二章 照明用高功率 LED 封装热管理技术研究

随着 LED 产业及其照明功率的迅速发展, LED 照明对热管理技术的要求也在不断的提高。第一章已经提到, 高功率 LED 的性能会随着结温的升高而降低, 因此对其进行合理的热分析与热设计有着重要的意义。照明用高功率 LED 散热要求高, 其封装热管理技术已不同于传统低功率 LED 与半导体分立器件的散热技术, 照明用高功率 LED 封装热管理技术已形成一套集传热学、机械学、材料学等学科于一体的技术体系。

照明用高功率 LED 封装热管理主要分为 4 个等级: 芯片级热管理 (0 级)、器件级热管理 (1 级)、板级热管理 (2 级) 以及系统级热管理 (3 级)<sup>[36]</sup>。每一个等级封装散热性能的好坏都将会对 LED 总体性能产生很大的影响, 下面我们就从这 4 个等级来对照明用高功率 LED 封装热管理技术进行研究。

### § 2.1 高功率 LED 芯片级热管理技术

LED 芯片是高功率 LED 照明光源的核心部件, 它主要由半导体材料通过 MOCVD 外延等工艺制作而成。芯片热传导性能的好坏也会对热量的传导产生很大的影响。不同 LED 芯片, 其热传导结构也不一样, 下面我们主要从正装、倒装及垂直这三种结构来介绍高功率 LED 芯片热结构与散热材料的选择。

#### 1. 正装结构 LED 芯片

图 2.1 为正装结构 LED 芯片的基本构造。正装结构 LED 芯片的衬底通常以蓝宝石 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 为材料, 因为蓝宝石衬底的稳定性好、机械强度高、且生产技术成熟。但使用蓝宝石作为衬底也存在一些问题, 如蓝宝石导热性能不好, 阻碍了 LED 芯片热量的传导; 且蓝宝石的硬度很高, 减薄和切割困难; 还有外延材料与蓝宝石热膨胀系数不匹配, 容易造成热应力集中, 使外延层产生大量缺陷。

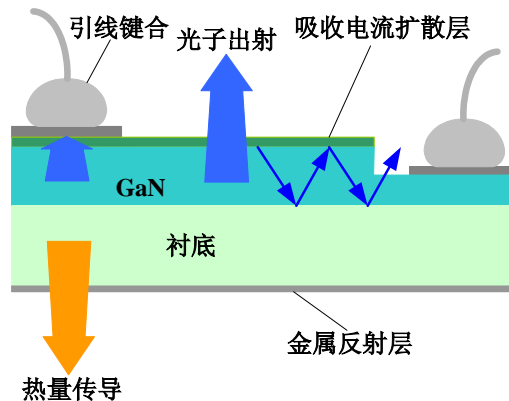


图 2.1 正装结构 LED 芯片

## 2. 倒装结构 LED 芯片

针对传统正装结构 LED 芯片的导热性能差和取光效率低等问题, 2001 年, 美国 LumiLEDs 公司研制出了导热性能好、取光效率高的 AlGaInN 功率型倒装芯片结构<sup>[15]</sup>。如图 2.2 所示, 有源层产生的光线直接透过上部透明的蓝宝石衬底, 解决了 P 型、N 型欧姆接触电极与蓝宝石之间多次反射和吸收, 以及键合引线对光线的遮挡等方面的影响, 而且还可以适当增大欧姆接触层的厚度而不必考虑其透光性, 从而改善了注入电流扩展的效果, 降低了正向压降; 同时有源层通过导热系数高的焊球直接与硅衬底键合, 便于热量的传导, 提高了芯片的热传导性能。

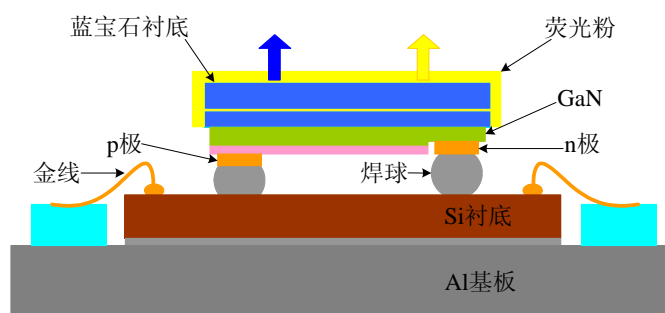


图 2.2 倒装结构 LED 芯片

## 3. 垂直结构 LED 芯片

倒装结构 LED 芯片的发光效率（即量子效率）与传热性能虽得到了一定的提高, 但其制造成本高及工艺复杂仍制约了 LED 在普通照明领域的应用, 并且与荧光灯等一些照明光源相比, 其发光效率仍然较低。因此, 国外各大 LED 厂商开始通过引入垂直结构来提高 LED 芯片的热传导性能及其发光效率<sup>[37]</sup>。

垂直结构 LED 芯片的两个电极分布在 LED 的上下两侧（如图 2.3 所示），由于上下两电极呈垂直结构，使得电流几乎全部垂直流过 GaN 基外延层。因此，电流分布均匀，能充分利用发光层的材料，产生的热量减少，发光效率提高。用金属衬底代替传统的蓝宝石衬底，使其热传导性能得到了很大的提高。目前，随着导通孔（导热、导电）技术、表面粗化技术在垂直结构 LED 芯片上的应用，使得 LED 芯片能获得更高的热传导性能和发光效率<sup>[38,39]</sup>。

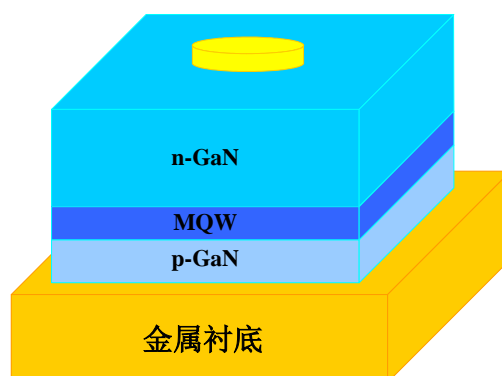


图 2.3 垂直结构 LED 芯片

## § 2.2 高功率 LED 器件级热管理技术

LED 向普通照明领域发展，其芯片在大电流下产生比早期 LED 大 10 倍以上的光通量，传统的引脚式封装及 SMD 封装已不能满足其散热要求，必须采用导热性能和可靠性更高的封装材料及有效的散热设计来解决失效问题。

### § 2.2.1 高功率 LED 单芯片封装结构

目前，较为典型的高功率 LED 单芯片封装结构为 Luxeon 系列功率型 LED（如图 2.4 所示），该结构是将倒装芯片倒装焊接在硅载体上，然后把完成倒装焊接的硅载体粘结在铜热沉上，最后装入塑封管壳进行封装。该芯片键合层采用的是导热系数较高的锡铅焊料，相比于导热系数较低的导热胶，芯片键合层的热传导性能得到了很大的提高。硅载体由于具有与芯片相近的热膨胀系数，降低了界面层间的热应力，提高了可靠性。但该封装结构热界面数量多、结构复杂、成本高，还无法普遍应用于普通照明领域<sup>[26]</sup>。

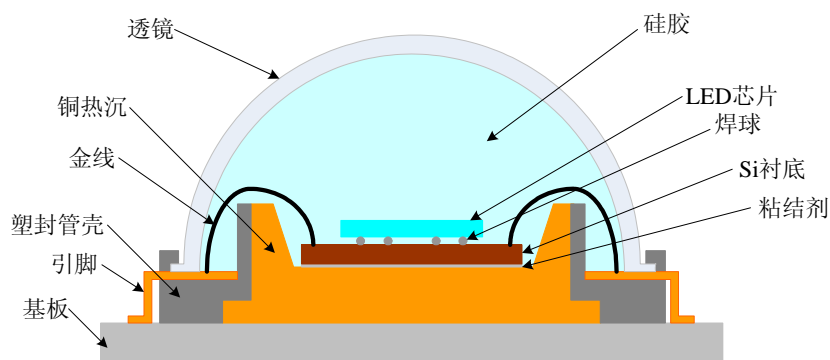


图 2.4 高功率 LED 单芯片封装结构

### § 2.2.2 高功率 LED 多芯片封装结构

普通照明需要的不仅仅是发光效率，它还需要有足够的光通量，单颗芯片的光通量已远远不能满足其要求；并且虽然目前能承受瓦级功率甚至 5W 以上的 LED 芯片已经出现，但其发光效率却远远不及小功率芯片（1W 以下），还无法实现经济照明。因此，很多 LED 厂家开始用增加芯片数量的方法来满足普通照明领域对光通量的要求，即 LED 多芯片封装结构。

NeoPac 系列高功率 LED 多芯片封装结构是以硅作为衬底的多芯片组合（如图 2.5 所示）。LED 芯片倒装焊接在硅衬底上，芯片产生的热量可直接通过硅衬底传导到外部热沉上，大大减少了热界面数量，提高了散热性能。同时根据所需输出光功率的大小，可改变底座上排列芯片的数目<sup>[40]</sup>。

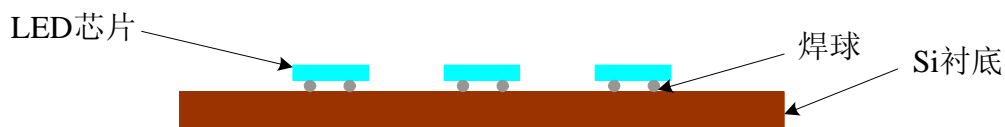


图 2.5 NeoPac 系列高功率 LED 多芯片封装结构

高功率 LED 多芯片封装结构组合密度高，可承受高功率负载，光通量大，且热界面数量少，热阻低，在大电流下有较高的光输出功率。但由于产生的热量大，需要有散热性能好的外部散热器的支持。

### § 2.2.3 晶圆级 LED 阵列封装结构

晶圆级 LED 阵列封装结构如图 2.6 所示。LED 芯片通过倒装焊接在硅晶圆上；硅晶圆具有预先刻蚀好的凹槽，这主要是为了防止环氧树脂在下一道封装工艺中流动；环氧树脂通过注射器点封到硅晶圆上，并通过紫外光矫正来完成封装工艺；最后将晶圆切割后就得到可用的 LED 器件<sup>[41]</sup>。与图 2.4 所示封装结构相比，晶圆级 LED 阵列封装工艺简单、结构紧凑、热界面数量少、内部热阻小，在提高器件传热性能的同时还可以实现高密度 LED 照明系统封装。

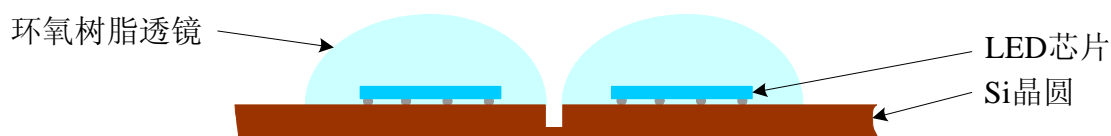


图 2.6 晶圆级 LED 阵列封装

## § 2.3 高功率 LED 板级热管理技术

### § 2.3.1 高功率 LED 封装基板材料

目前 LED 产品大多采用金属基印刷电路板（MCPCB）封装。如图 2.7 所示，MCPCB 是将原有的印刷电路板附贴在另外一种热传导效果更好的金属上，可提高电路板的散热性能。常用的金属材料有铝和铜，但铜由于其价格比较高而应用不多。与传统的 FR4 PCB 相比较，MCPCB 的散热性能得到了很大的提高，但 MCPCB 中导电绝缘层的热传导率很低，成为芯片热源与金属核心板间的传导瓶颈。

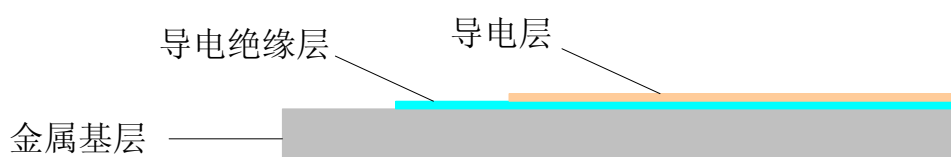


图 2.7 金属基印刷电路板结构

Lamina Ceramics<sup>[42]</sup>开发的金属低温共烧陶瓷基板实现了 LED 封装散热性能的突破,如图 2.8 所示。多层陶瓷通过低温烧结在金属芯上,由于陶瓷具有很高的绝缘性,因此可以把电路直接布置在陶瓷层上,LED 芯片则可以直接安装到金属芯上。基板金属芯采用的是铜钼铜(CuMoCu)复合材料,具有很高的热传导系数和与芯片相近的热膨胀系数,因而能很好地提高 LED 的散热性能和降低芯片与金属层之间的热应力。

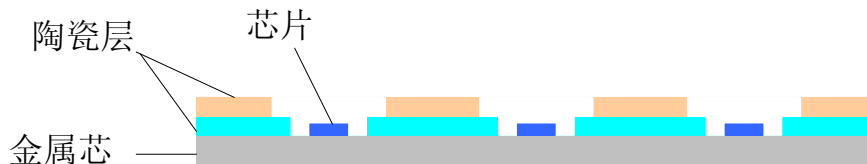


图 2.8 金属低温共烧陶瓷基板结构

陶瓷材料由于其良好的导热性能和绝缘性能在 LED 封装基板中的应用越来越多。德国 Curmilk 公司研制出的具有高导热性能的覆铜陶瓷基板采用的就是陶瓷(AIN)和铜在高温高压下烧结而成,如图 2.9 所示。由于氮化铝(AIN)的热膨胀系数比较低,与硅的热膨胀系数相当,因而降低了封装热应力<sup>[23]</sup>。



图 2.9 覆铜陶瓷基板结构

### § 2.3.2 高功率 LED 器件阵列封装结构

LED 器件阵列封装结构是市场上高功率 LED 照明灯具普遍采用的一种封装形式(如 LED 路灯)。如图 2.10 所示,LED 器件呈阵列排布能增大系统的有效热接触面积,提高系统的散热效率。并且多个器件组合能大大提高系统的发光功率,以满足高功率 LED 照明灯具高照度和高亮度的要求。

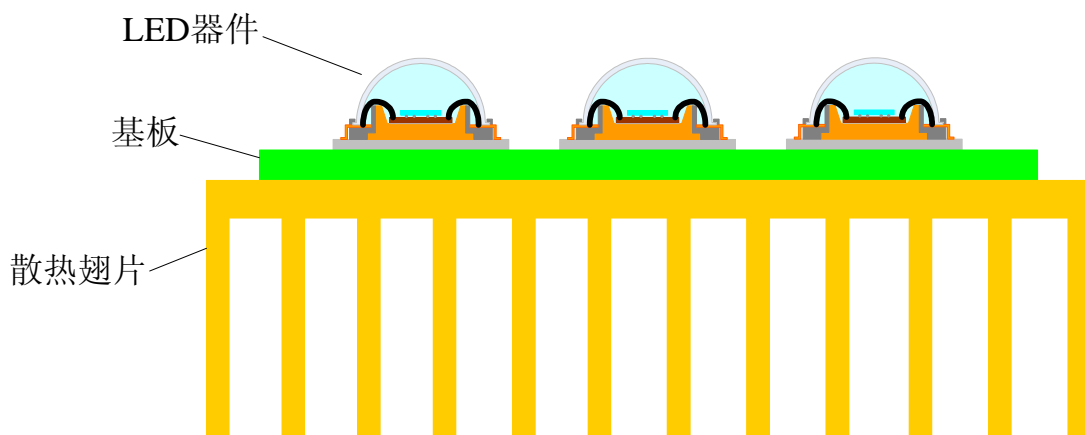


图 2.10 高功率 LED 器件阵列封装结构

### § 2.3.3 COB 封装结构

COB 即板上芯片直装是一种通过粘结剂或焊料将 LED 芯片直接键合到电路板上，再用引线键合实现芯片与电路板间电互联的封装技术，其结构如图 2.11 所示。COB 封装常用的基板有 FR4 PCB、MCPCB 以及陶瓷基板等。COB 技术主要用于高功率多芯片阵列的 LED 封装，由于该结构芯片集成度高，热界面数量少，不仅能提高封装功率密度，而且还可以有效降低封装热阻，提高热传导性能。

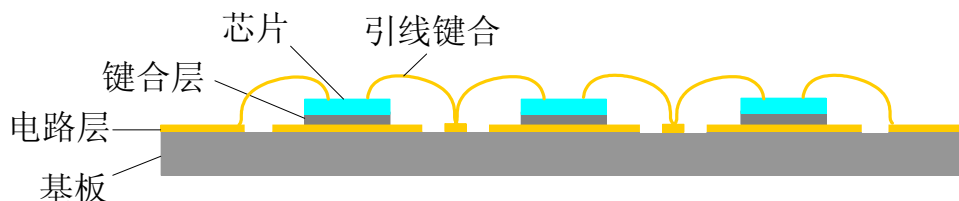


图 2.11 COB 封装结构

## § 2.4 高功率 LED 系统级热管理技术

### § 2.4.1 高功率 LED 系统封装技术 (SiP-LED)

系统封装 (SiP, System in Package) 是指在一块封装基板上集成具有系统功能的封装或亚 (子) 系统功能的组装件，它是最近几年来为适应整机的便携式发展和系统小型化的要求而发展起来的一种新型封装集成方式。在 SiP-LED 中，我们寻求的是怎样把 LED 系统的主要性能集成在一个 3D 封装内，构建成一个更为复杂、完整的系统，这些集成的性能包括光输出、信号输出、功率输出、传感器以及热管理等。同其他封装结构相比，SiP 具有集成度高、工艺兼容性好、可提供更多新功能、开发周期短、易于分块测试、成本低等优点<sup>[43]</sup>。

### § 2.4.2 高功率 LED 系统散热器结构

除选用高热导率的散热基板和热界面材料外，如何将 LED 器件产生的热量有效耗散到环境中也是一个关键，这就需要具有强大散热性能的外部散热器的支持。常用的散热器结构主要分为被动散热结构和主动散热结构。

#### 1. 被动散热结构

被动散热结构一般选用具有高肋化系数的翅片，通过翅片和空气间的自然对流将热量耗散到环境中。散热器翅片的形状可以设计成多种阵列形状，如柱形阵列、弧形阵列以及条形阵列等，如图 2.12 所示。通过加快空气对流速度和增大翅片的有效散热面积可以提高被动散热器的散热性能。被动散热翅片结构稳定性好，机械强度高、且成本低，是高功率 LED 封装最常用的散热结构。

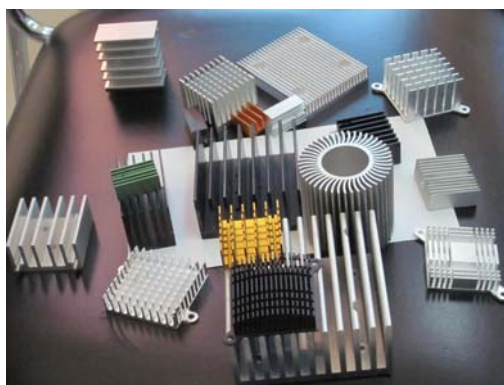


图 2.12 被动散热器结构

## 2. 主动散热结构

目前市场上常用的主动散热结构主要有翅片+风扇结构、热管结构以及半导体制冷结构。

### (1) 翅片+风扇结构

翅片+风扇结构主要是通过加大空气对流系数来带走更多的热量,如图 2.13 所示。但风扇稳定性不好、可靠性低、寿命短,因此很少应用于高功率 LED 散热。

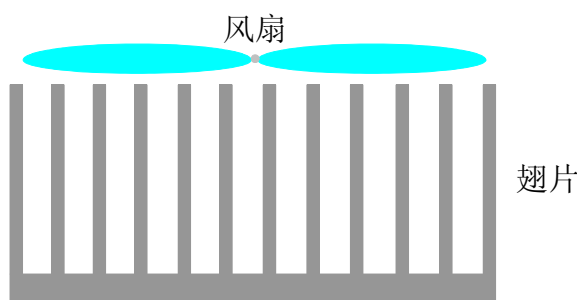


图 2.13 翅片+风扇结构

### (2) 热管结构

热管主要是通过内部吸液芯中的液体蒸发汽化与冷凝回流来进行热量的传递。由于液体汽化会吸收很大的热量,因此热管具有很好的散热性能。通常会在热管冷凝段增加翅片以加快水蒸汽的冷凝速度。其结构如图 2.14 所示。

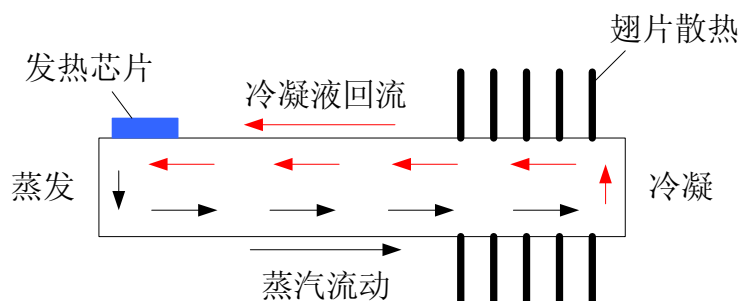


图 2.14 热管散热结构

### (3) 半导体制冷结构

半导体制冷是利用热电效应(即帕米尔效应)的一种制冷方法。图 2.15 是一个简单的半导体制冷结构。当电流从 N 端流向 P 端时,接触电位差与外电场反向,电

子反抗电场力做功,其能量来自结合处的晶体点阵,结果使结合处的温度下降,这就是冷端。当电流从 P 端流向 N 端时,接触电位差与外电场同向,电场力做功使电子能量增加,结果使结合处的温度升高,这就是热端。半导体制冷结构紧凑、制冷密度大、散热性能好,但其成本较高,不适合在向低成本发展的高功率 LED 封装结构中应用。

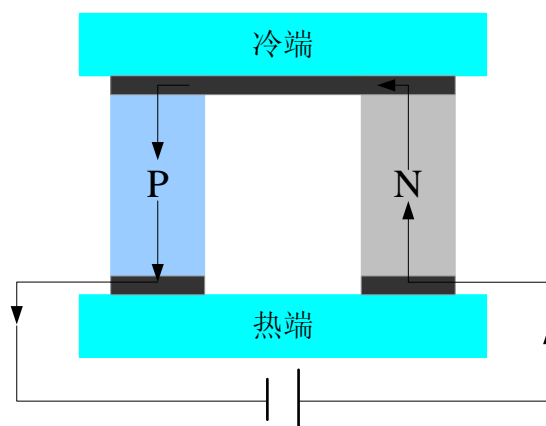


图 2.15 半导体制冷结构

## § 2.5 本章小结

本章主要对照明用高功率 LED 封装热管理技术进行了研究与分析。照明用高功率 LED 封装热管理主要分为 4 个等级: 芯片级热管理 (0 级)、器件级热管理 (1 级)、板级热管理 (2 级) 以及系统级热管理 (3 级), 每一个等级散热性能的好坏都将会对 LED 总体性能产生很大的影响, 本章主要从这 4 个等级来对照明用高功率 LED 封装热管理技术进行研究。

## 第三章 高功率 LED 照明系统热结构设计

目前市场上的一些高功率 LED 照明灯具（如 LED 路灯）为了达到高照度和高亮度的要求，常常采用多器件阵列组合封装或多芯片集成阵列封装形式。随着照度和亮度的提高，LED 照明灯具产生的热流密度和热量也越来越大，适当的结温和良好的机械可靠性是 LED 稳定运行的保障，过高的结温将会使 LED 光衰严重，寿命下降，这将严重阻碍 LED 在普通照明领域的发展。为了进一步降低高功率 LED 的结温和提高其机械可靠性，本章将运用扩散热阻原理及热阻网络模型对多器件阵列组合封装和多芯片集成阵列封装形式进行热结构设计和热阻、结温的计算。

### § 3.1 传热的基本原理

传热学是研究具有不同温度的物体间热量传递的学科，与热力学不同，传热学的目的在于分析热量传播的速率而不是研究热平衡体系。分析物体的热量传递可以确定物体系统内从瞬态至稳态的温度分布，从而可以了解物体的传热特性以便于进行系统热量的调整和温度的控制；分析物体的热量传递还可以计算和控制系统的热流量，从而达到稳定系统温度，节能减排的目的。

#### § 3.1.1 传热的基本方式

传热的基本方式分为三种：传导、对流和辐射<sup>[44]</sup>。这三种传热方式是相互联系的，任何一种方式都不能独立于其它一种或两种方式而存在，因此，物体系统的热量传递往往是包含着几种传热方式的同时发生。

##### (1) 热传导

当物体系统内部或接触的两个物体之间存在温度梯度时，则热量就会由温度高的区域向温度低的区域转移，我们称这种热量传递方式为热传导，它是借助于大量物质分子热运动产生互相撞击而实现的热量的传递过程。热传导的基本公式（即傅里叶定律）为：

$$q_0 = -kA_0 \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3-1-1)$$

式中  $q_0$  为热流量，即热传导所传递的热量； $k$  为材料的导热系数； $A_0$  为物体热传导过程中的横截面积； $\frac{\Delta T}{\Delta x}$  为热流方向上的温度梯度；“—”表示热传导服从热力学第二定律，即热量沿着温度降低的方向传递。

##### (2) 热对流

热对流是指固体中热量通过流动介质，借助流体自身的位移来实现由空间的一处传播到另一处的现象，这是由于固体表面和与之相接触的流体之间存在温度差而引起

的热量交换。热对流可以分为自然对流和强制对流两类。自然对流是由于温度差而引起的；强制对流是由于外力因素加大流体的流动速度而形成的。热对流的基本公式为（即牛顿冷却定律）：

$$q_0 = hA_0\Delta T \quad (3-1-2)$$

式中  $q_0$  为热流量，即热对流所传递的热量； $h$  为流体对流换热系数； $A_0$  为固体与流体的有效接触面积； $\Delta T$  为固体表面与流体之间的温度差。

### (3) 热辐射

热辐射指的是由温差引起的电磁波辐射，温度高的物体发射的电磁能被温度低的物体吸收并转变为热量。与热传导和热对流不同，热辐射不需要介质，它可以在真空中进行热量传递。热辐射的基本公式可以用斯蒂芬—波尔兹曼方程来表示：

$$q_0 = \varepsilon\sigma A_0(T_1^4 - T_2^4) \quad (3-1-3)$$

式中  $q_0$  为热流量，即热辐射所传递的热量； $\varepsilon$  为实际物体黑度，其值介于 0~1 之间。 $\sigma$  为斯蒂芬—波尔兹曼常数，其值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； $A_0$  为高温物体辐射面面积； $T_1$  为高温物体辐射面的绝对温度， $T_2$  为低温物体辐射面的绝对温度。

## § 3.1.2 热阻网络

### 1. 热阻

在传热学中，用热阻来表示物体对热流阻碍作用的大小。物体的热阻越大，表明该物体的传热能力越小。热阻的单位用  $^\circ\text{C}/\text{W}$  或  $\text{K}/\text{W}$  表示，即导热介质两端或导热介质间的温度差与通过热流功率的比值。因此半导体器件封装热阻可以定义为结点与外部环境之间的温度差与流过该器件热功率之比，其数学表达方式<sup>[45]</sup>：

$$R_{\theta JA} = (T_J - T_A) / P \quad (3-1-4)$$

式中  $R_{\theta JA}$  为器件结点与外部环境之间的总热阻， $T_J$  为器件结点温度， $T_A$  为外部环境温度， $P$  为流过器件的热功率。

$R_{\theta JA}$  作为器件总热阻，它还可以细分为传导热阻、对流热阻、接触热阻以及扩散热阻等。通常很多热阻计算公式以传导热阻和对流热阻之和作为系统总热阻，其表达方式分别为 (3-1-5) 和 (3-1-6)，而常常忽略了接触热阻和扩散热阻。

$$R_{\theta 1} = \frac{L}{kA_1} \quad (3-1-5)$$

$$R_{\theta 2} = \frac{1}{hA_2} \quad (3-1-6)$$

其中， $R_{\theta 1}$  为传导热阻， $L$  为传导模块厚度， $k$  为模块材料的导热系数， $A_1$  为模块截面积， $R_{\theta 2}$  为器件壁面与流体之间的对流热阻， $h$  为对流换热系数， $A_2$  为器件壁

面与流体的有效接触面积。

高功率 LED 照明系统结构复杂，热界面层数多，热分析困难，如果用热阻网络模型来分析 LED 照明系统的传热性能，不仅可以使系统的传热概念更加清晰，而且计算也简便。

## 2. 高功率 LED 系统热阻网络模型

高功率LED系统的结温主要由系统的环境温度、PN结到环境的热阻所决定。图 3.1为LED系统的热阻网络模型，高功率LED系统的总热阻可以表示为从PN结到外界环境热路上几个热阻之和。

$$R_{\theta J-A} = R_{\theta chip} + R_{\theta chip-submount} + R_{\theta submount} + R_{\theta submount-board} + R_{\theta board} + R_{\theta board-heat\ sink} + R_{\theta heat\ sink} \quad (3-1-7)$$

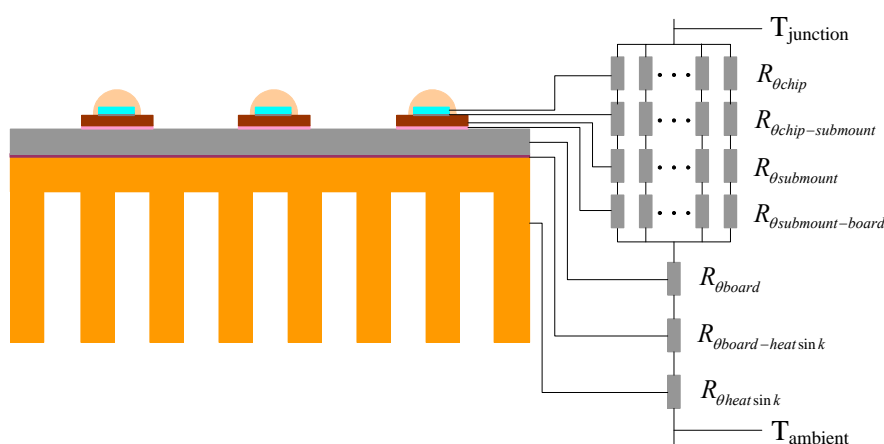


图 3.1 LED 系统的热阻网络模型

同时，我们也可以把图3.1的LED系统的热阻网络模型简化成图3.2模式。假设LED系统中的某一模块部分（如board）横截面面积为A，厚度为L，此时该部分的热阻可以表示为：

$$R_{th} = \frac{L}{A \cdot \lambda} \quad (3-1-8)$$

其中  $\lambda$  为该部分材料的导热系数。

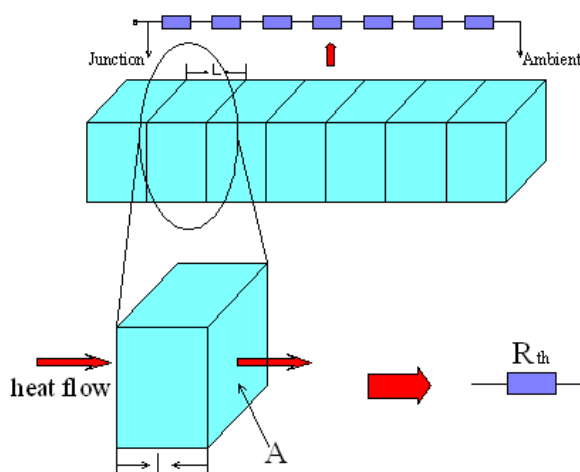


图 3.2 简化后的 LED 系统热阻网络模型

由公式 (3-1-7)、(3-1-8) 我们可以知道, 各个部分材料的导热系数、厚度以及面积的大小都关系到该部分热阻的大小, 同时各个部分的热阻大小又直接关系到LED系统结温的高低。因此, 必须要对LED系统封装结构的各个部分进行材料优化和结构设计, 使其热阻最小化, 同时也要找出LED系统封装结构中热阻最大的部分, 进而针对该散热瓶颈进行改善。

### § 3.2 高功率 LED 照明系统扩散热阻研究

#### § 3.2.1 扩散热阻原理

当热流量通过多个横截面面积不同的固体时, 将会产生扩散热阻和压缩热阻。特别是当热源和与之相接触的大面积基板或散热器接触面积较小时, 将会产生明显的扩散热阻, 这样将会造成局部温度很高, 并且散热困难。目前市场中的一些 LED 照明灯具为了达到预期的散热效果, 只一味的加大灯具散热面积, 而常常忽视了扩散热阻对整个散热系统产生的影响, 这样虽然达到了散热要求, 但是却浪费了很多散热材料, 造成 LED 灯具体积过大, 成本过高。

图 3.3 表示的是一个简单的 LED 封装热工模型, 在热流通过的路径中, 扩散热阻存在于每一热界面层。

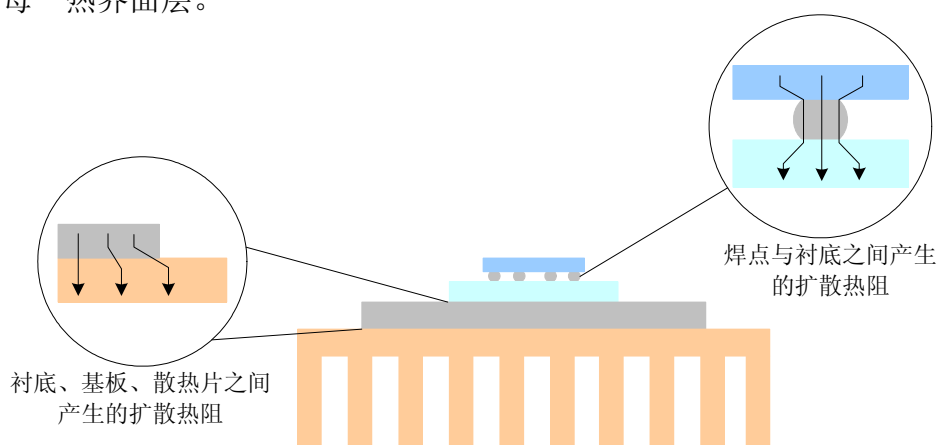


图 3.3 LED 封装中产生的扩散热阻

扩散热阻可以通过以下公式计算<sup>[46,47]</sup>:

$$R_s = \frac{\psi_{avg}}{\sqrt{\pi k A}} = \frac{\sqrt{A_2} - \sqrt{A_1}}{k \sqrt{\pi A_2 A_1}} \times \frac{\lambda k A_2 R_0 + \tanh(\lambda t)}{1 + \lambda k A_2 R_0 \tanh(\lambda t)} \quad (3-2-1)$$

$$\lambda = \frac{\pi^{3/2}}{\sqrt{A_2}} + \frac{1}{\sqrt{A_1}} \quad (3-2-2)$$

式中,  $A_1$  为热源横截面面积,  $A_2$  为散热板横截面面积,  $k$  为散热板材料的导热系数,  $t$  为散热板厚度,  $R_0$  为散热板的平均热阻。由公式可知, 扩散热阻与热源和散

热板的横截面面积有关,增大散热板的横截面面积虽然能降低其传导热阻,但同时扩散热阻却变大了。因此合理的设计散热板或散热片横截面面积已成为半导体封装系统散热管理的重要关键所在。

### § 3.2.2 扩散热阻实验分析

#### 1. 实验设备

##### (1) 发热器件

包括三个 1W 的 LED 器件和一个 3W 的 LED 器件,直径为 20mm,如图 3.4 所示。在实验中,我们把 LED 器件等效成直径为 20mm 的发热元件,通过输入相应的额定功率使其发热。



(a)

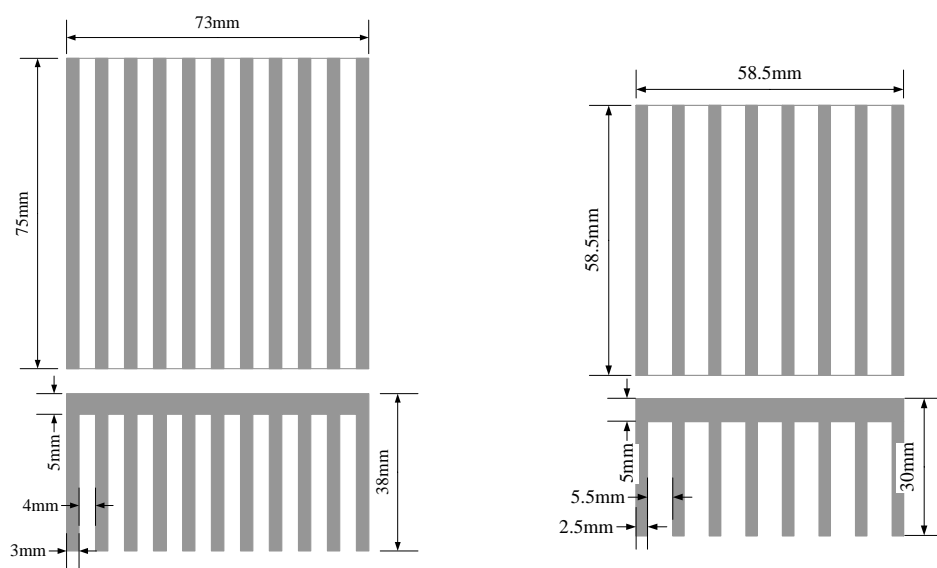


(b)

图 3.4 (a) 三个 1W 的 LED 器件 (b) 3W 的 LED 器件

##### (2) 散热翅片

包括两个散热面积不同的散热翅片,其几何形状如图 3.5 所示。LED 器件通过导热硅胶粘结在散热翅片上,使其产生的热量通过散热翅片散发到外部环境中。



(a) 翅片 1

(b) 翅片 2

图 3.5 散热翅片几何形状图

### (3) T3Ster 瞬态热阻测试仪

T3Ster (图 3.6) 是 MicReD 研发制造的先进的热测试仪, 用于测试 IC、LED、散热器等电子器件的热特性。T3Ster 及其相关结果评价软件可以对 LED 灯具热特性提供一个完美的解决方案。LED 灯具的热时间常数非常小, T3Ster 可以以高精度和高数据量瞬态测量  $1\mu\text{s} \sim 100\mu\text{s}$  内 LED 结温的变化情况。包括 LED Die-attach 在内所有热量传导路径上的材料都可以得到精确测量。



图 3.6 T3Ster 瞬态热阻测试仪

## 2. 实验设计步骤

### (1) 实验一设计步骤

先把 3W 的 LED 器件置于翅片 1 中央 (如图 3.7a 所示), 并给其输入 3W 的热功率, 同时通过 T3Ster 测量其热阻值; 然后移去 3W LED 器件, 把 3 个 1W 的 LED 器件通过并联连接排布在翅片 1 上 (如图 3.7b 所示), 并给其输入 3W 的热功率, 同时通过 T3Ster 测量其热阻值。

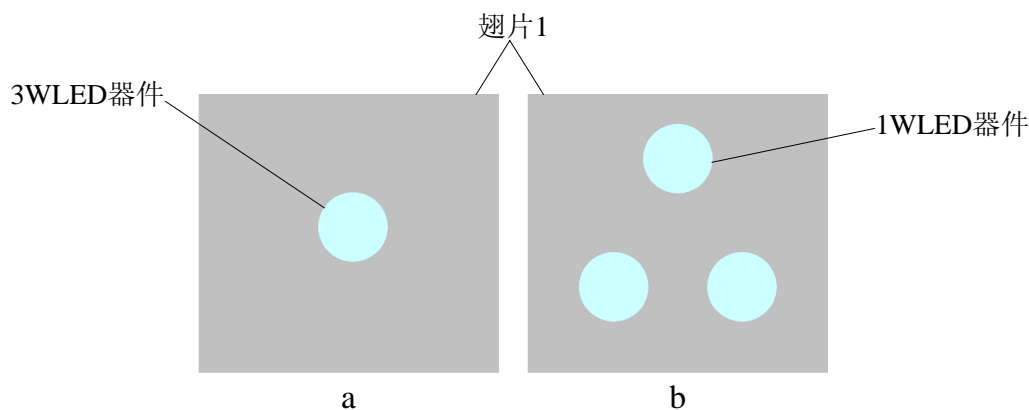


图 3.7 LED 器件布置图

实验一主要是通过改变发热元件与散热翅片的接触面积 (输入功率与外界环境温度固定) 来观察整个系统扩散热阻的变化情况。

### (2) 实验二设计步骤

把 3W 的 LED 器件分别置于翅片 2 的 3 个不同位置 (如图 3.8 所示), 输入 3W 的热功率, 并通过 T3Ster 测量其热阻值。

实验二主要是通过改变发热元件在散热翅片上的排布位置(发热元件与散热翅片的接触面积、输入功率以及外界环境温度等固定)来观察整个系统扩散热阻的变化情况。

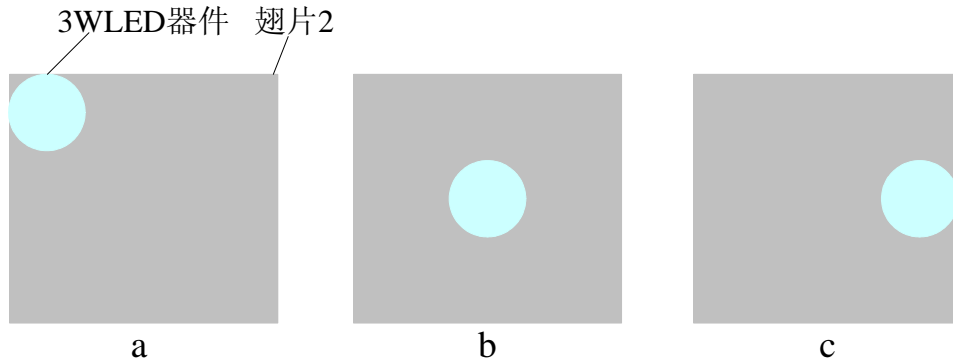


图 3.8 LED 器件分布图

### 3. 实验结果分析

#### (1) 实验一结果分析

扩散热阻主要是由于发热元件与散热翅片的有效接触面积小于散热翅片的横截面积所引起的，因此扩散热阻主要存在于散热翅片处。

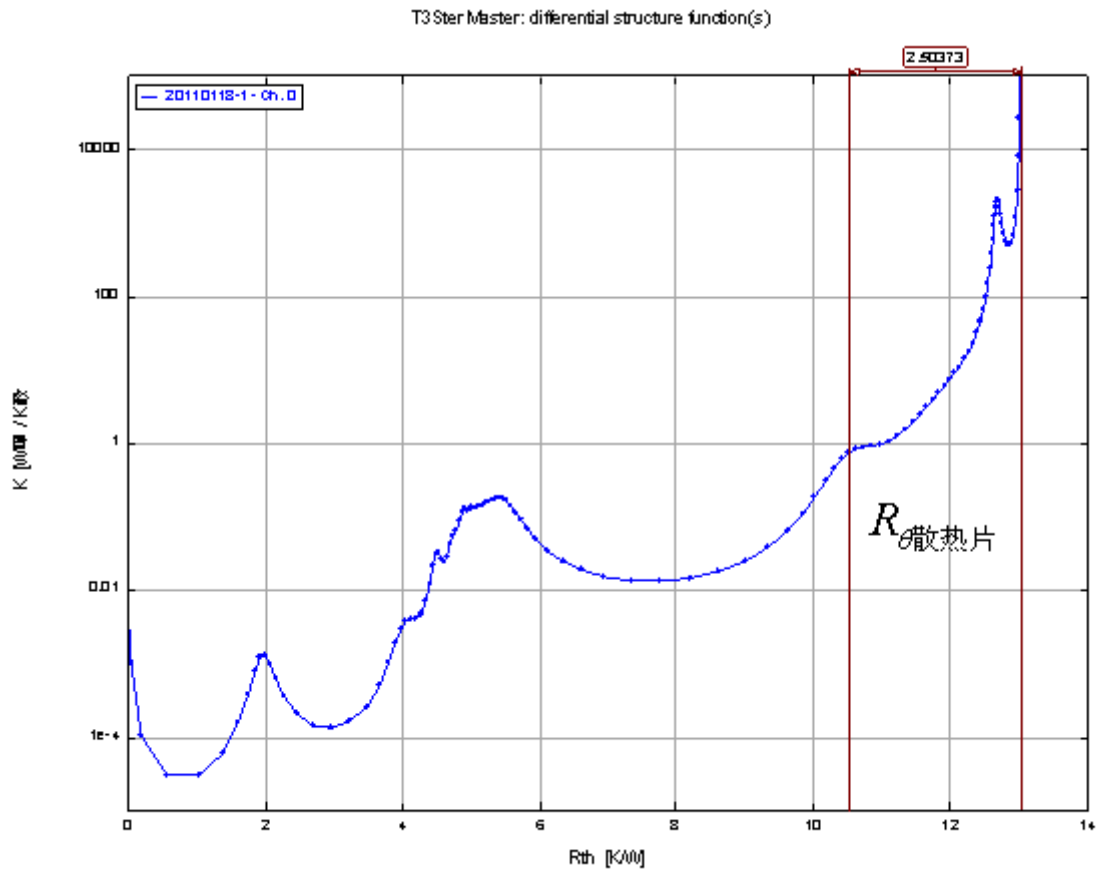


图 3.9 3W LED 器件+翅片 1 微分结构函数

图 3.9 为 3W LED 器件+翅片 1 微分结构函数，其中纵坐标  $K[W^2S/K^2]$  为热容与热阻的比值，即  $K = C/R_{th}$ ，横坐标  $R_{th}$  为 LED 各部件所代表的热阻值。图中所标注

的部分为翅片 1 的热阻： $R_{\theta_{\text{散热片}}} = 2.5037\text{K/W}$ 。

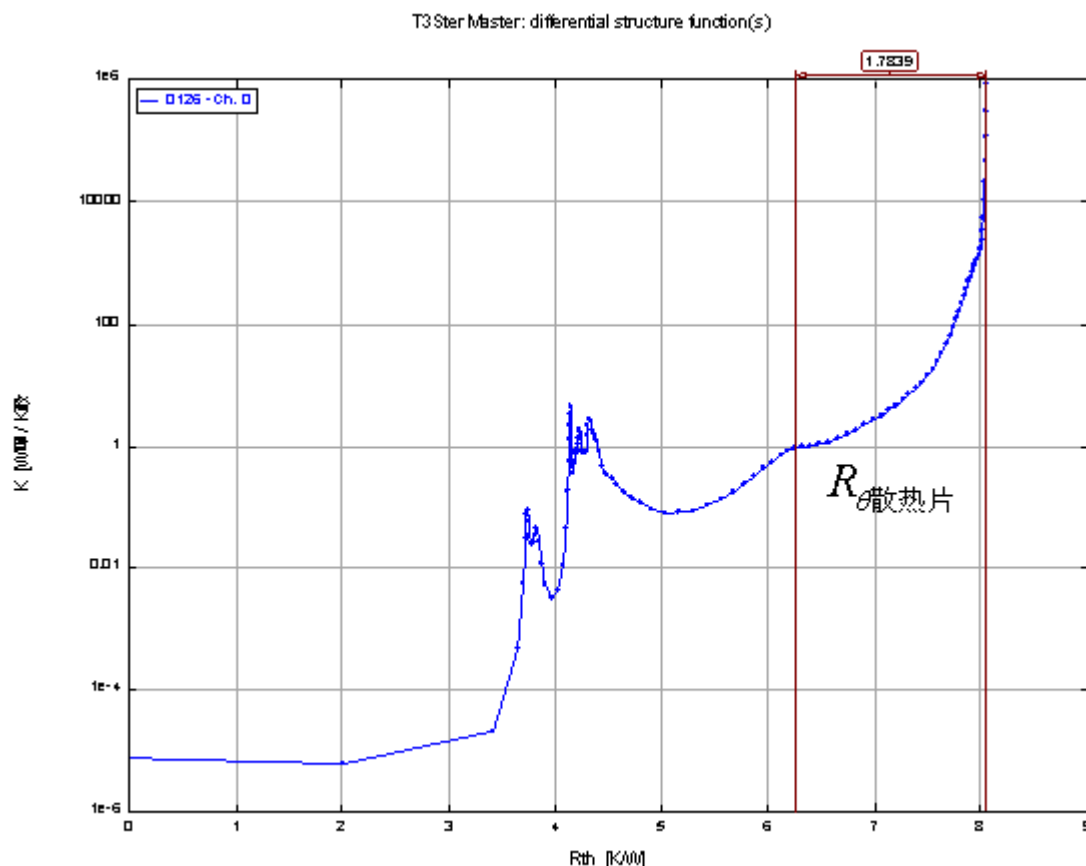


图 3.10 3 个 1W LED 器件+翅片 1 微分结构函数

图 3.10 为 3 个 1W LED 器件+翅片 1 微分结构函数，其中翅片 1 的热阻为  $R_{\theta_{\text{散热片}}} = 1.7839\text{K/W}$ 。

由图 3.9 和 3.10 可知，虽然两次测试用的都是同一散热翅片，但两次的散热翅片热阻值却不同，这主要是由扩散热阻所引起的。3 个 1W LED 器件+翅片 1 结构的散热系统所产生的扩散热阻要小于 3W LED 器件+翅片 1 结构的散热系统。通过实验一我们可以得知当发热元件和散热翅片的有效接触面积与散热翅片的横截面面积越接近，其产生的扩散热阻越小。

## (2) 实验二结果分析

由图 3.11 可知，三次测试所用的发热元件与散热翅片都一样，但三次测得的系统总热阻值却不相同。当 LED 器件置于翅片 2 中心位置时的总热阻最小，置于翅片 2 角落位置时的总热阻最大，并且从图中还可以看出三次测试热阻的不同之处主要存在于散热翅片热阻处，LED 器件置于翅片 2 角落位置时的翅片热阻要明显大于置于翅片 2 中心位置时的翅片热阻。由此可以得知，发热元件在散热翅片上的安装位置不同也会产生不同的扩散热阻，当发热元件置于散热翅片的中心位置时其扩散热阻最小。

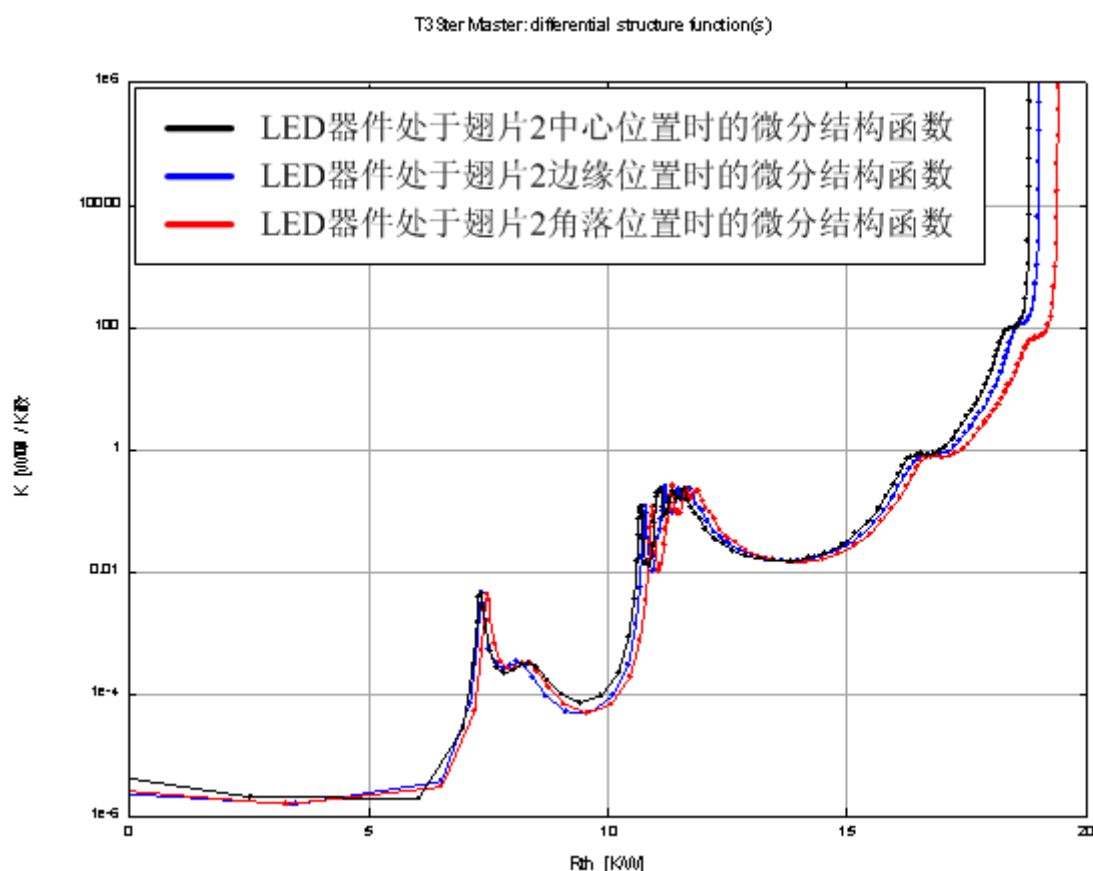


图 3.11 LED 器件置于翅片 2 上的 3 个不同位置时的微分结构函数

#### 4. 实验总结

从实验一和实验二可以得出, 扩散热阻不仅与发热元件和散热翅片的有效接触面积有关, 而且还和发热元件在散热翅片上的安装位置有关。因此, 在进行 LED 封装系统热设计时, 不能一味地增加散热翅片横截面面积, 这样虽然能达到散热要求, 但是却浪费了大量散热材料, 从而造成 LED 照明灯具成本居高不下。合理地增加 LED 器件与散热翅片的有效接触面积及选择最优的安装位置才是 LED 照明系统热设计的重要关键所在。

### § 3.3 单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统热设计

单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装结构不仅可以提高 LED 照明灯具的发光照度和亮度, 而且还可以增加发热元件与散热板(或散热片)的有效接触面积, 从而能减小散热系统的扩散热阻, 提高 LED 照明灯具的可靠性。本文主要从单芯片高功率 LED 器件的热工模型优化及散热基板材料的选择来进行多器件阵列组合封装结构的热设计。

## § 3.3.1 单芯片高功率 LED 器件的热工模型优化

传统的单芯片高功率 LED 器件的热工模型如图 3.12 所示，根据扩散热阻实验中所测得的结果，该封装结构器件热阻值大约在 11~15K/W 之间。

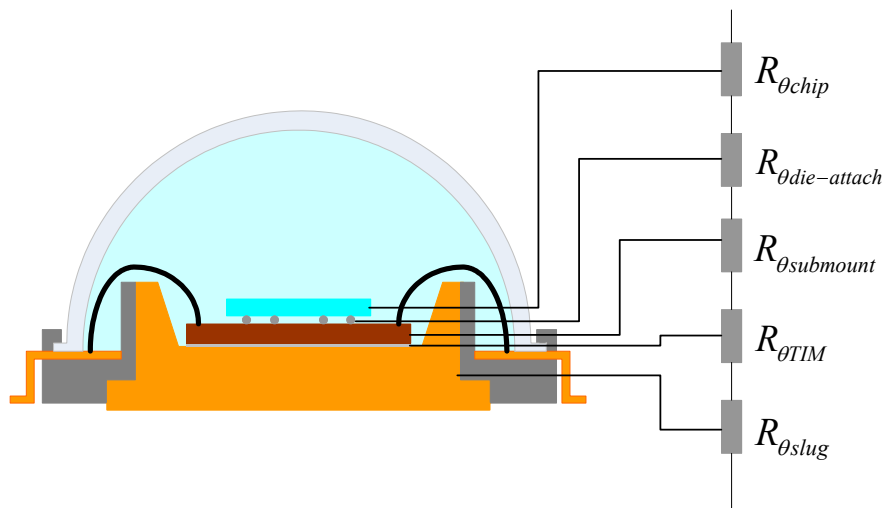


图 3.12 传统高功率 LED 器件的热工模型

该封装结构器件结构复杂，热界面数量多，成本高，离 LED 在普通照明领域的照明要求还存在一定的差距。

优化后的单芯片高功率 LED 器件的热工模型如图 3.13 所示。AlN 上布有铜电路层，作为芯片基座，LED 芯片通过焊球键合在铜焊盘上，芯片上面填有一层硅胶用于取光透镜。其中芯片的尺寸为 1mm×1mm×0.1mm，焊点高度为 0.02mm，铜焊盘的尺寸为 1.3mm×1.3mm×0.05mm，AlN 基座的尺寸为 3.5mm×3.5mm×0.5mm。相关材料的导热系数如表 3.1 所示。由于透镜的导热系数很低，为了简化热阻网络模型，我们不考虑透镜的热传导性能，即把透镜热阻等效成无穷大。因此，优化后的器件总热阻为：

$$R_{\theta LED} = R_{\theta chip} + R_{\theta die-attach} + R_{\theta copper-layer} + R_{\theta submount} \quad (3-3-1)$$

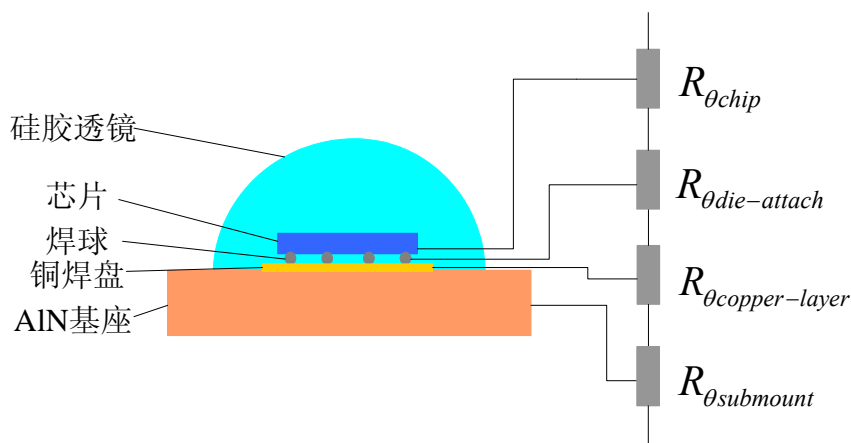


图 3.13 优化后的单芯片高功率 LED 器件的热工模型

表 3.1 相关材料的导热系数

Materials	Thermal conductivity (W/m.K)
Chip(GaN)	130
Sapphire	41.9
Solder	50
copper	385
Ceramic(AlN)	170
Conductive adhesive	5
dielectric	2.2
Silicone	0.18
Al	170

把热阻传导公式 (3-1-5) 带入式 (3-3-1) 中可得总热阻为:

$$R_{\theta LED} = 3.1 \text{K/W}$$

与传统高功率 LED 器件相比, 优化后的器件热界面数量少, 芯片直接键合在 AlN 基座上, 减少了内部热传递的环节, 这样芯片产生的热量就可以直接通过 AlN 基座迅速扩散到外部散热装置, 大大提高了散热性能。并且 AlN 材料的热膨胀系数很低, 因此能有效地避免因层间热应力而引起的翘曲、裂纹 (特别是在芯片键合层和引线键合层处) 等一些失效问题。

### § 3.3.2 散热基板材料的选择

目前市场上 LED 照明灯具最常用的基板材料为 Al, 即 Al 基板 (如图 3.14a 所示), 相比于早期的 FR4 基板, Al 基板在导热性能上有了很大的提高, 但由于 Al 具有导电性能, 因此通常会在 Al 基板上布一层导电绝缘层, 用来阻止电流的扩散。导电绝缘层虽然绝缘性能好, 但其导热性能却很差, 因此间接地阻碍了 LED 灯具热量的扩散。AlN 基板属陶瓷材料, 具有很好的绝缘性能和导热性能, 因此在上面布电路线时就不需要再加绝缘层, 其结构如图 3.14b 所示。

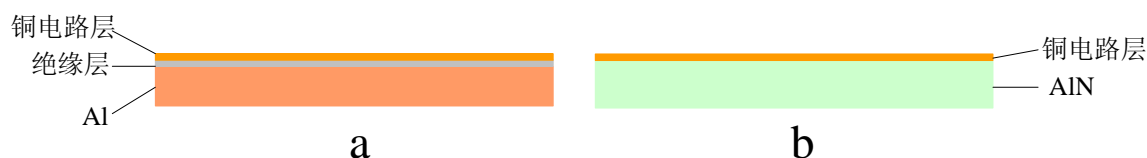


图 3.14 (a) Al 基板 (b) AlN 基板

已知阵列组合封装系统中基板的大小为  $32\text{mm} \times 32\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ , Al 基板上绝缘层的厚度为  $0.1\text{mm}$ , 因此根据热阻传导公式 (3-1-5) 可以得出 Al 基板与 AlN 基板的热阻分别为 (不考虑铜电路层的热阻):

$$R_{\theta Al\text{-board}} = R_{\theta dielectric} + R_{\theta Al} = 0.9362 \text{K/W}$$

$$R_{\theta AlN\text{-board}} = 0.0086 \text{K/W}$$

其中由于绝缘层的热导率很小，厚度薄，存在很大的横向热阻，因此其有效传热截面积要远远小于实际面积，在带入公式（3-1-5）时我们把其传热截面积等效成与热源面积一样大。

采用 AlN 基板不仅可以提高阵列组合封装系统的散热性能，而且由于 AlN 热膨胀系数低，能很好地降低界面层间的热应力，提高 LED 封装系统的热-机械可靠性。

### § 3.3.3 单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装结构

本文采用的是由 4 个 1W 高功率 LED 器件（如图 3.13 结构所示）组成的阵列封装结构，LED 器件呈 2×2 阵列形式排布在 AlN 基板上，同时在 AlN 基板背面增加 8mm 高的翅片以增加系统的散热面积，其结构尺寸如图 3.15 所示。

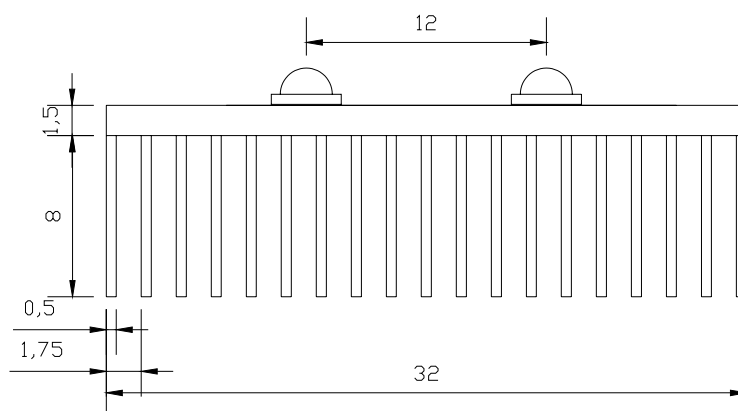


图 3.15 单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装结构

系统的热阻网络模型如图 3.16 所示，芯片产生的热量通过 AlN 基座迅速扩散到外部基板散热装置，最后转移到空气中。假设每个 LED 器件的芯片结温相同，并且忽略各接触面之间的接触热阻，运用并联电阻公式，则 4 个高功率 LED 器件的总热阻可以表示成：

$$\frac{1}{R_{\theta LED total}} = \frac{1}{R_{\theta LED 1}} + \frac{1}{R_{\theta LED 2}} + \frac{1}{R_{\theta LED 3}} + \frac{1}{R_{\theta LED 4}} = \frac{4}{R_{\theta LED}} \quad (3-3-2)$$

$$R_{\theta LED total} = R_{\theta LED} / 4 \quad (3-3-3)$$

同理，器件键合层的总热阻可以表示成：

$$R_{\theta TIM total} = R_{\theta TIM} / 4 \quad (3-3-4)$$

因此，我们可以得出系统的总热阻为：

$$R_{\theta total} = \frac{R_{\theta LED}}{4} + \frac{R_{\theta TIM}}{4} + R_{\theta Board + Fins} \quad (3-3-5)$$

已知  $R_{\theta LED total} = R_{\theta LED} / 4 = 3.1 / 4 = 0.775$  K/W， $R_{\theta TIM total} = R_{\theta TIM} / 4 = 0.816 / 4 = 0.204$  K/W，其中，

$$R_{\theta Board + Fins} = R_{Board} + R_{Fins} + R_{Air} + R_s \quad (3-3-6)$$

$$R_{Board} = 0.0086 \text{ K/W}$$

$$R_{Fins} = 0.8398/19 = 0.0442 \text{ K/W}$$

$$R_{Air} = \frac{1}{hA_0} = \frac{1}{7.5 \times 0.0125} = 10.667 \text{ K/W}$$

$$R_s = \frac{(32-7) \times 1000}{1.772 \times 170 \times 32 \times 7} \cdot \frac{316.73 \times 170 \times 1024 \times 10^{-6} \times 10.72 + 0.475}{1 + 316.73 \times 170 \times 1024 \times 10^{-6} \times 10.72 \times 0.475} = 0.778 \text{ K/W}$$

得出：

$$R_{\theta Board+Fins} = 11.5 \text{ K/W}$$

把所有数据带入式 (3-3-5) 得：

$$R_{\theta total} = \frac{R_{\theta LED}}{4} + \frac{R_{\theta TIM}}{4} + R_{\theta Board+Fins} = 0.775 + 0.204 + 11.5 = 12.48 \text{ K/W}$$

由公式 (3-1-4) 可以得出：

$$\text{系统结温 } T_J = R_{\theta total} \times P + T_A = 12.48 \times 4 + 25 = 74.92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

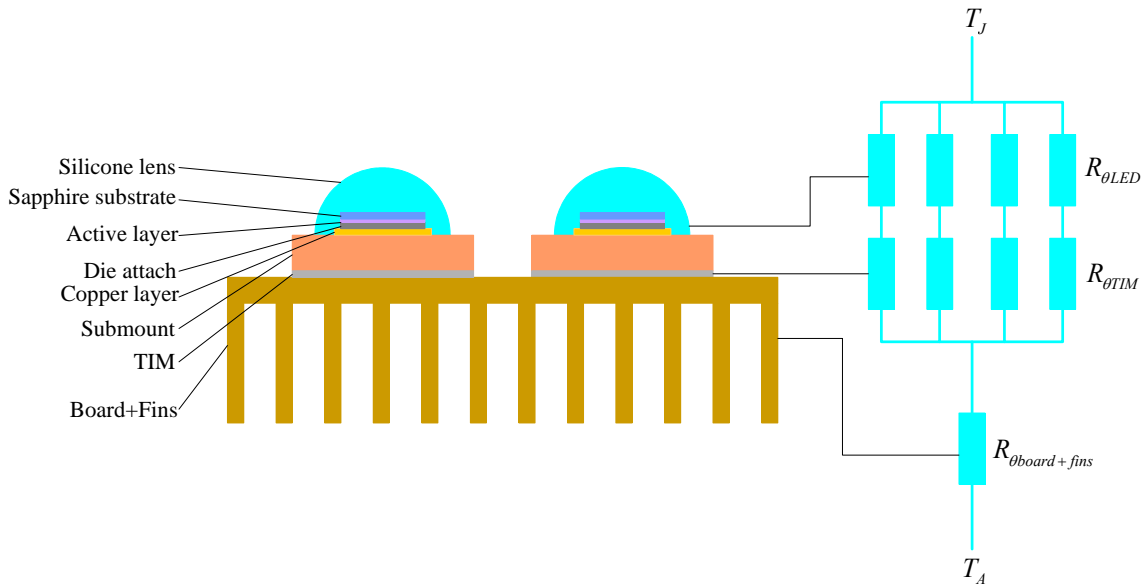


图 3.16 系统热阻网络模型

如果把 4 个 1W 高功率 LED 器件换成单个 4W 高功率 LED 器件(假设 1W 和 4W 两种 LED 器件的结构大小和热阻相同)，则此时系统的总热阻表达式为：

$$R_{\theta total} = R_{\theta LED} + R_{\theta TIM} + R_{\theta Board+Fins} \quad (3-3-7)$$

由式 (3-3-5) 和 (3-3-7) 可知，相比于由单个 4W 高功率 LED 器件组成的传统封装结构，阵列组合封装结构的热阻要小的多。

由扩散热阻实验可知，封装系统扩散热阻的大小与发热元件和散热翅片的有效接触面积有关，同功率下发热元件和散热翅片的有效接触面积越大，系统的扩散热阻越小。由公式 (3-2-1) 可得：

$$\frac{R'_s}{R''_s} \approx \frac{\sqrt{A_2'} - \sqrt{A_1'}}{k\sqrt{\pi A_2' A_1'}} \cdot \frac{k\sqrt{\pi A_2'' A_1''}}{\sqrt{A_2''} - \sqrt{A_1''}} = 0.437$$

其中,  $R_s'$  为阵列组合封装结构的扩散热阻,  $R_s''$  为 4W 传统封装结构的扩散热阻。

单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装结构可靠性高、扩散热阻小、有效热接触面积大, 能充分利用散热器的散热功能, 使之散热效率达到最大化, 适合于高光通量 LED 灯具 (如 LED 路灯) 的组合封装。

### § 3.4 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统热设计

多芯片集成阵列封装结构也是提高 LED 照明灯具照度和亮度的有效途径之一, 与传统 LED 封装结构相比, 多芯片集成阵列封装结构紧凑、功率密度高、体积小、成本低, 并且能有效降低封装热阻, 提高 LED 器件的散热性能和可靠性。同时, 由于功率密度高, 多芯片集成阵列封装结构会产生很大的热量, 因此, 合理的系统散热结构设计就成为降低 LED 芯片结温, 提高封装热-机械可靠性的重要途径。

#### § 3.4.1 多芯片高功率 LED 发光组件 (MCM-LED) 的热工模型

本文所要研究的多芯片高功率 LED 发光组件热工模型如图 3.17 (a) 所示。该模型由 19 颗尺寸大小为  $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 、发光功率为 1W 的 GaN 基 LED 芯片组成, 芯片通过回流焊用 Sn63Pb37 锡膏直接焊接在半径为 5mm、厚度为 0.3mm 的 AlN 基座上。相关材料的导热系数如表 3.2 所示。

表 3.2 相关材料的导热系数

Materials	Thermal conductivity (W/m.K)
Chip(GaN)	130
Sapphire	41.9
Solder(Sn63Pb37)	50
AlN	170
Conductive adhesive	5
$\text{Al}_2\text{O}_3$	20
Silicone	0.18
Al	170

与前面所分析的单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装模型不同, 如图 3.17 (b) 所示, MCM-LED 采用了 COB 封装方式, 直接将芯片焊接在基板上 (AlN), 取消了 LED 器件中的内部热沉, 减少了热界面数量, 大大提高了散热性能。假设每个 LED 芯片的结温相同, 并且忽略各接触面之间的接触热阻, 运用并联电阻公式, 则 19 颗 LED 芯片的总热阻可以表示成:

$$\frac{1}{R_{\theta\text{ChipTotal}}} = \frac{1}{R_{\theta\text{Chip1}}} + \frac{1}{R_{\theta\text{Chip2}}} + \dots + \frac{1}{R_{\theta\text{Chip19}}} = \frac{19}{R_{\theta\text{Chip}}} \quad (3-4-1)$$

$$R_{\theta\text{ChipTotal}} = R_{\theta\text{Chip}} / 19 \quad (3-4-2)$$

同理，芯片键合层的总热阻可以表示成：

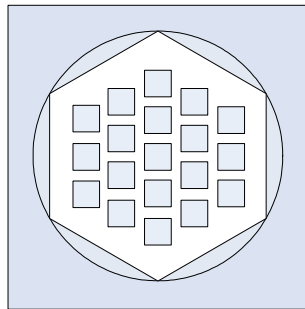
$$R_{\theta_{Chip-Subtotal}} = R_{\theta_{Chip-Sub}} / 19 \quad (3-4-3)$$

因此，我们可以得出模型的总热阻为：

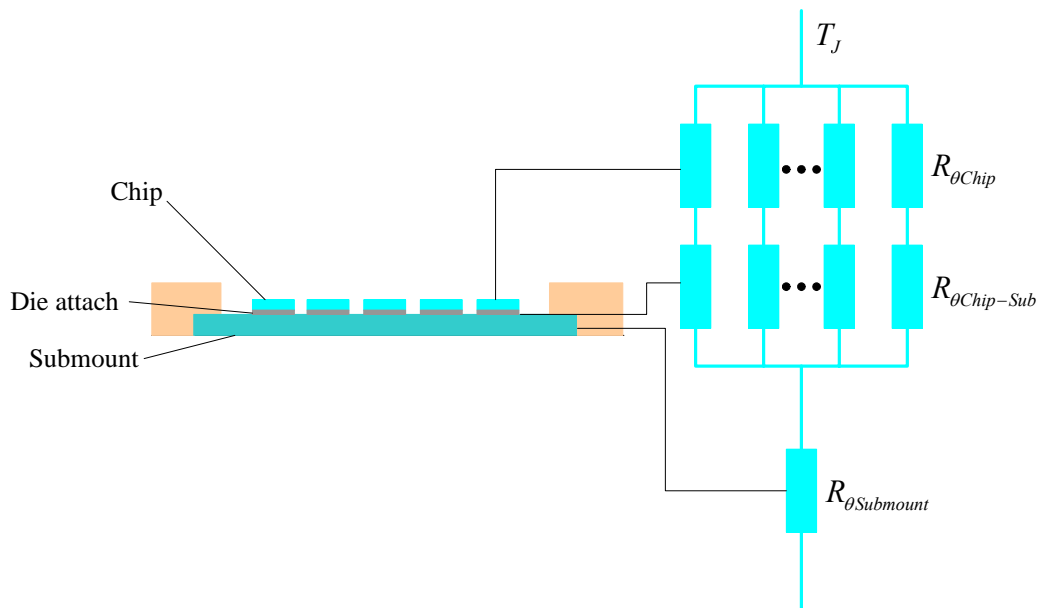
$$R_{\theta_{total}}' = \frac{R_{\theta_{Chip}}}{19} + \frac{R_{\theta_{Chip-Sub}}}{19} + R_{\theta_{Sub}} \quad (3-4-4)$$

把热阻传导公式 (3-1-5) 带入式 (3-4-4) 中可得总热阻为：

$$R_{\theta_{total}}' = 0.169K/W$$



(a) 封装平面结构



(b) 封装热阻网络模型

图 3.17 多芯片高功率 LED 发光组件热工模型

### § 3.4.2 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统散热器设计

MCM-LED 由于热界面数量少，芯片产生的热量可直接传导到 AlN 基座上，然后利用 AlN 本身良好的散热性能把热量迅速扩散到空气中。但 AlN 基座面积小，热

流密度高达  $24\text{W}/\text{cm}^2$ ，其有限的表面散热已经无法满足芯片的散热需求，因此需要设计外部散热系统来对 MCM-LED 进行有效的结温控制。

由于 MCM-LED 发热面积小，如果采用传统翅片散热结构的话，势必会造成散热板面积过大而有效热接触面积过小，这样会使系统扩散热阻变大，系统散热效率变低。因此，针对 MCM-LED 热流密度大、发热面积小的特点，我们采用的是太阳花结构散热器，其系统结构尺寸如图 3.18 所示。散热器由导热系数高、成本低的铝合金材料制成，其上下设有两个凹槽，MCM-LED 组件通过导热银胶粘接在上凹槽中，并用硅胶灌封充当透镜作用，在上凹槽中镀膜可起到聚集光线的作用，提高系统的发光效率，下凹槽中可以放置 LED 电源驱动板等辅助设备，使整体系统结构更紧凑，体积更小。散热器周围包含有 60 片散热翅片，MCM-LED 产生的热量主要通过周围的散热翅片扩散到空气中。该散热结构与 MCM-LED 有效热接触面积比例大，能大大降低系统的扩散热阻，提高系统的散热效率。

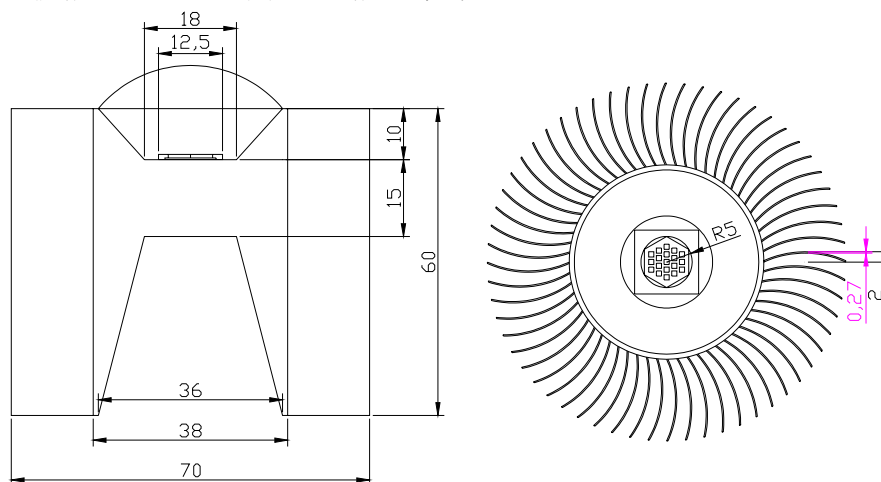


图 3.18 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统结构图

图 3.19 为 MCM-LED 系统的热阻网络模型。由于硅胶透镜的导热系数很低，热阻很大，为了简化热阻网络模型，我们不考虑硅胶透镜的热传导性能，即把硅胶透镜热阻等效成是无穷大的。因此，系统的总热阻可以表示为：

$$R_{\theta total}'' = \frac{R_{\theta Chip}}{19} + \frac{R_{\theta Chip-Sub}}{19} + R_{\theta Sub} + R_{\theta Sub-HeatSink} + R_{\theta HeatSink} \quad (3-4-5)$$

其中， $R_{\theta Sub-HeatSink} = 0.128\text{K}/\text{W}$ ， $R_{\theta HeatSink} = 1.75\text{K}/\text{W}$ ，

$$R_s = \frac{(9-5) \times 1000}{3.14 \times 170 \times 9 \times 5} \cdot \frac{416.7 \times 170 \times 81 \times 10^{-6} \times 3.14 \times 1.75 + 1}{1 + 416.7 \times 170 \times 81 \times 10^{-6} \times 3.14 \times 1.75 \times 1} = 0.167\text{K}/\text{W}$$

把所有数据带入式 (3-4-5) 得： $R_{\theta total}'' = 2.214\text{K}/\text{W}$

由公式 (3-1-4) 可以得出：

$$\text{系统结温 } T_J = R_{\theta total}'' \times P + T_A = 2.214 \times 19 + 25 = 67.066\text{ }^\circ\text{C}$$

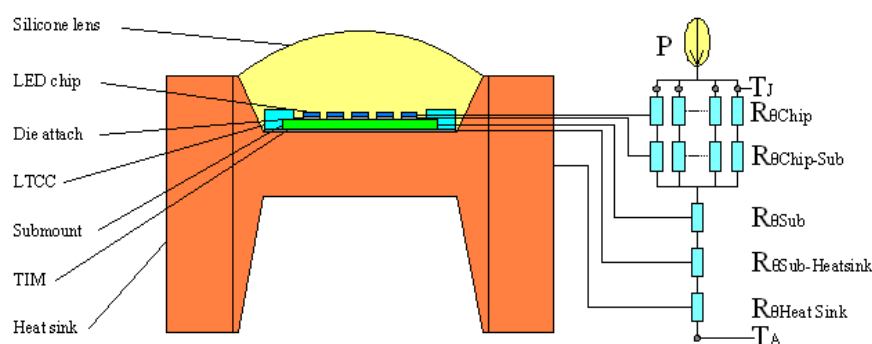


图 3.19 MCM-LED 系统热阻网络模型

### § 3.5 本章小结

本章主要进行了单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统及高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的热设计和热管理。首先运用 T3Ster 瞬态热阻测试仪对高功率 LED 照明系统中的扩散热阻进行实验分析并同时测量相关热特性参数，接着结合实验分析的结果及测量的相关参数对高功率 LED 照明系统进行热结构设计及材料优化，最后运用热阻网络模型对单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统的热阻及结温进行计算分析。得出以下结论：

(1) 由扩散热阻实验分析得出：扩散热阻不仅与发热元件和散热翅片的有效接触面积有关，而且还和发热元件在散热翅片上的安装位置有关。合理地增加 LED 器件与散热翅片的有效接触面积及选择最优的安装位置可以有效降低系统的扩散热阻，提高散热器的散热效率。

(2) 运用热阻网络模型计算求得的单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统与高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的热阻和结温分别为 (12.48 K/W、74.92℃) 和 (2.214 K/W、67.066℃)。



## 第四章 高功率 LED 照明系统的有限元仿真分析及其参数优化

### § 4.1 ANSYS 稳态热分析及其热应力分析

ANSYS 作为新颖的有限元分析软件在热分析问题方面具有强大的功能。ANSYS 热分析是基于能量守恒原理的热平衡方程,用有限元法计算物体内部各节点的温度,并导出其他热物理参数。运用 ANSYS 软件可进行热传导、热对流、热辐射、相变、热应力以及接触热阻等问题的分析求解。本文我们主要进行的是稳态热分析和热应力分析<sup>[48]</sup>。

#### § 4.1.1 稳态热分析

当流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量时,即系统的净热流率为 0 时,系统处于热稳态。热稳态的条件可表示为:

$$Q_{input} + Q_{generate} = Q_{output} \quad (4-1-1)$$

在稳态热分析中任一节点的温度都不随时间的变化而变化。稳态热分析的能量平衡方程可表示为(以矩阵形式表示):

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (4-1-2)$$

式中:  $[K]$  为传导矩阵,包含导热系数、对流系数和辐射率等;  $\{T\}$  为节点温度向量;  $\{Q\}$  为节点热流率向量,包含热生成。

ANSYS 利用模型的几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件,生成  $[K]$ 、 $\{T\}$  及  $\{Q\}$ 。

#### § 4.1.2 热应力分析

热应力分析主要分析相互接触的不同结构体或同一结构体中的不同部分之间由于热膨胀系数不匹配而产生的热应力。热应力问题实际上是热和应力两个物理场之间的相互作用,故属于耦合场分析问题。与其他耦合场的分析方法类似,ANSYS 提供了两种分析热应力的方法:直接法和间接法。

直接法是指直接采用具有温度和位移自由度的耦合单元,同时得到热分析和结构应力分析的结果;间接法则是指先进行热分析,然后将求得的节点温度作为体载荷施加到结构应力分析中。

### § 4.2 单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统热应力分析

高功率 LED 系统封装结构中,在热膨胀系数相差较大的两种材料界面处容易产生

热应力与热应变。因此，若LED结温过高的话，在该两种材料界面处就会产生较大的热应力与热应变，而过高的热应力与热应变又会使LED结构发生变形，甚至会在界面处产生裂缝，这将会大大增加该部分的热阻，从而又会进一步加剧LED结温的上升。所以，通过热应力分析，找出高功率LED系统封装结构的散热瓶颈部分及应力集中部分，有针对性的进行结构与材料优化，最后得到一个高热导的高功率LED系统封装结构。

本文采用间接法对单芯片高功率LED器件阵列组合封装结构进行热应力分析，即先进行稳态热分析，然后将求得的节点温度作为体载荷施加到结构应力分析中。ANSYS热分析的基本步骤包括：建立有限元模型；施加载荷计算；求解与后处理。

### § 4.2.1 稳态热分析

根据第三章中所设计的各部件尺寸大小，所建的封装结构模型如图4.1 (a) 所示，考虑到整体系统结构的对称性和复杂性，为了提高计算速度，我们只取其1/4结构进行模拟分析。

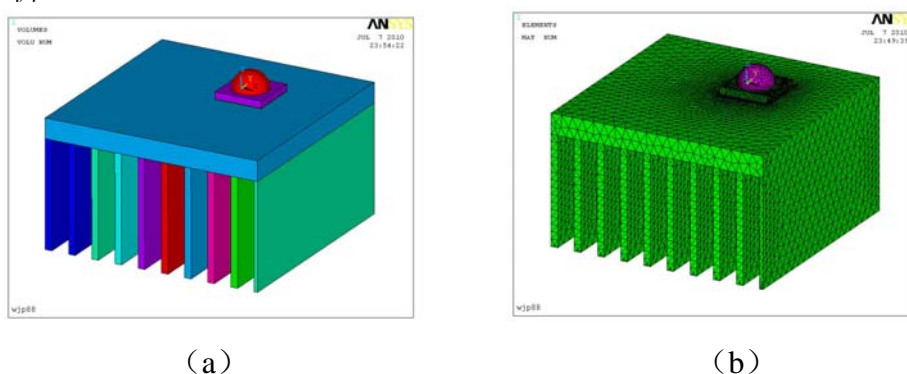


图 4.1 (a) 1/4 模型结构; (b) 划分网格后的 1/4 模型

模拟中选用的单元类型是SOLID70，整个1/4模型包含有167800个单元。划分网格后的实体模型如图4.1 (b) 所示。

芯片的PN结是发热源，即GaN有源层(1mm×1mm×0.01mm)，每颗芯片均产生1W的热量，所以还需要在GaN有源层上加载生热率，每颗芯片产生的生热率大小为 $1 \times 10^{11} \text{ W/m}^3$ 。由于系统属于自然对流换热，所以需要在散热板表面加载空气对流换热系数，其中空气对流换热系数设定为 $7.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ，环境温度及系统的初始温度设定为 $25^\circ\text{C}$ 。

模型稳态温度场分布如图4.2所示。从仿真结果中我们可以看出，透镜处的温度梯度要大于其他部件处的温度梯度，这说明芯片产生的热量主要通过热沉以及散热板传递到空气中，只有少部分热量通过透镜传递，这主要是因为热沉及散热板的热传导系数要远远高于透镜的热传导系数。系统中芯片的温度最高，为 $73.602^\circ\text{C}$ ，系统中的最低温度出现于散热板边缘，为 $68.403^\circ\text{C}$ 。系统的总体温度梯度较低，说明系统的整

体散热性能良好。由公式 (3-1-4) 可以得出系统的总热阻为:

$$R_{\theta total} = (T_J - T_A) / P_{total} = 12.15 \text{K/W}$$

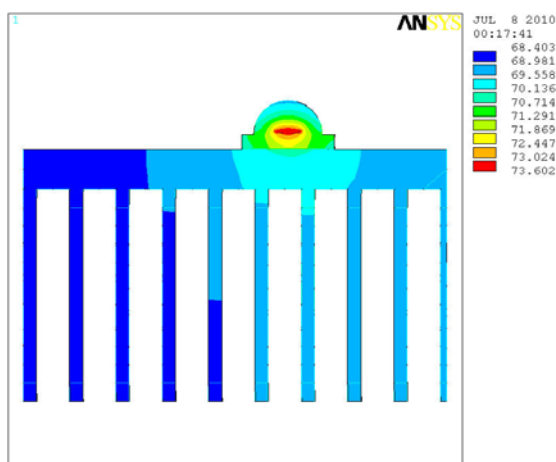


图4.2 单芯片高功率LED器件阵列组合封装系统温度场分布 (AlN散热板)

同时我们也对传统高功率LED器件 (如图3.12所示) 阵列封装结构和Al散热板结构分别做了仿真模拟。

传统高功率LED器件阵列封装结构的稳态温度场分布如图4.3所示 (与前面所分析的结构相比, 两者仅仅只是采用的LED器件结构不同, 其他部件结构大小和材料都一样)。系统结构中芯片的温度最高, 为75.589℃, 系统中的最低温度出现于透镜顶部, 为66.433℃。与前面所分析的结构相比较, 传统高功率LED器件阵列封装结构的结温要偏高, 且系统总体温度梯度也偏大, 这主要是由于传统高功率LED器件散热性能差、热阻高所致。因此, 合理的LED器件内部热设计也是提高系统散热性能的关键之一。

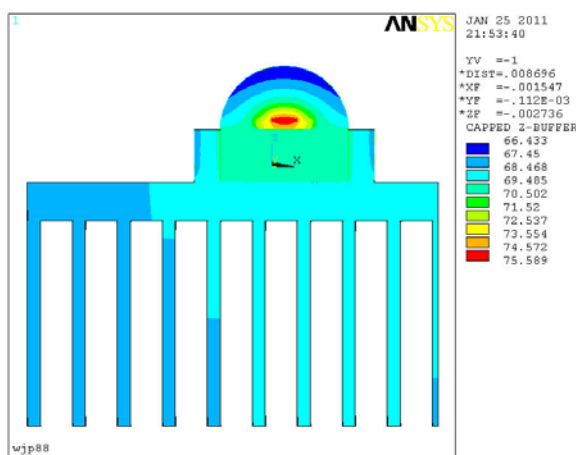


图4.3 传统高功率LED器件阵列封装系统温度场分布

采用Al散热板结构散热的单芯片高功率LED器件阵列组合封装系统温度场分布如图4.4所示 (与AlN散热板相比, 两者仅仅是选用的材料不一样, 整体结构尺寸大小都一样)。系统结构中芯片的温度最高, 为77.038℃, 系统中的最低温度出现于散热

板边缘，为68.344℃。与AlN散热板结构相比，Al散热板结构的结温要偏高，特别在LED器件与Al散热板的连接处存在很大的温度梯度，这主要是由于Al板上导电绝缘层的导热系数低所致（因为Al是良好的导电体，所以在Al板上布置电路层必须先制备一层导电绝缘层），导致LED器件上的热量不能迅速地传导至散热板上。因此，选用AlN板可直接在上面布置电路层（AlN具有良好的绝缘性能），由于少了导电绝缘层这一热界面层，系统的散热性能得到了很大的提高。

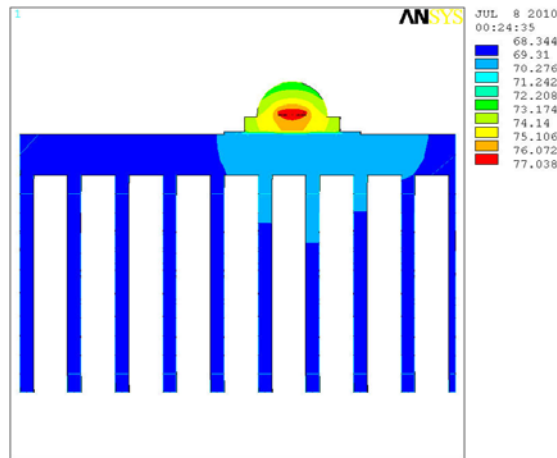


图4.4 单芯片高功率LED器件阵列组合封装系统温度场分布（Al散热板）

### § 4.2.2 热应力分析

由于高的结温和不同材料之间的热膨胀系数（CTE）不匹配，系统封装结构热界面层之间会产生热应力，导致翘曲、裂纹（特别是在芯片键合层和引线键合层处）的产生，甚至会发生失效和破坏，这会大大影响LED器件的电性能和热性能，从而进一步导致LED器件光性能降低，寿命下降。

表4.1 相关材料的机械性能参数

Material	CTE( $10^{-6}/K$ )	Poison's ratio	E(GPa)
Chip(GaN)	7.75	0.17	210
Sapphire	5.6	0.25	335
Solder	25	0.36	26
copper	17	0.34	110
Ceramic(AlN)	4.5	0.25	308
Conductive adhesive	30	0.35	40
dielectric	8	0.2	310
Silicone	38	0.4	5
Al	23	0.33	70
Si	2.8	0.25	131
Molding Compound	45	0.35	5.2

在热应力仿真分析中，我们将前面求得的稳态节点温度分布作为体载荷施加到系

统结构应力分析中,各部件相关材料的机械性能参数如表4.1所示。单芯片高功率LED器件阵列组合封装系统(AIN散热板)的等效应力分布如图4.5所示,在蓝宝石衬底与硅胶透镜的交界处、芯片键合层处以及铜电路层和AIN热沉交界处都存在比较大的热应力分布。如图4.6所示,蓝宝石衬底、GaN有源层以及铜电路层的最大热应力分别为158MPa, 133MPa 和 151MPa,且最大热应力都存在于这些部件的边角处。

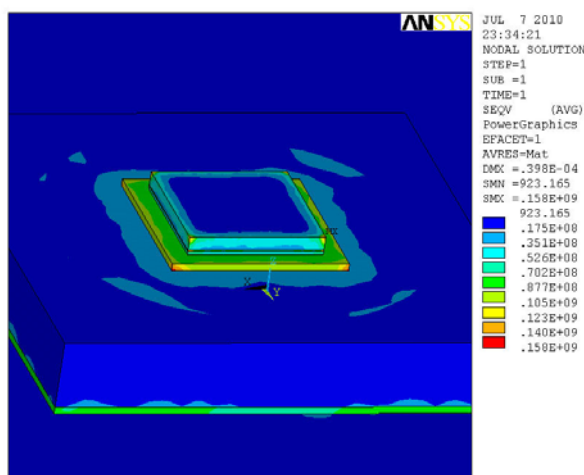


图 4.5 单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统的等效应力云图 (AIN 散热板)

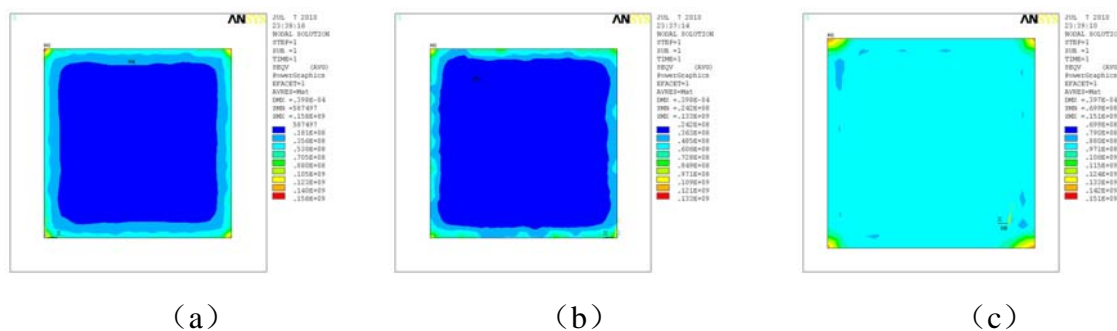


图4.6 (a) 蓝宝石衬底的热应力分布(b) GaN有源层的热应力分布(c) 铜电路层的热应力分布

同时我们也对传统高功率 LED 器件(如图 3.12 所示)阵列封装结构和 Al 散热板结构的热应力分布分别做了仿真模拟。

传统高功率 LED 器件阵列封装结构的等效应力分布如图 4.7 所示,在各热界面层之间容易产生应力集中。如图 4.8 所示,蓝宝石衬底和 GaN 有源层的最大热应力分别为 115MPa 和 179MPa。与前面所分析的结构相比较,传统高功率 LED 器件阵列封装结构的热应力要偏高,这主要是由于传统高功率 LED 器件散热性能差、结温高所致。因此,合理的 LED 器件内部热设计在降低系统结温的同时也降低了系统热应力,提高了系统可靠性。

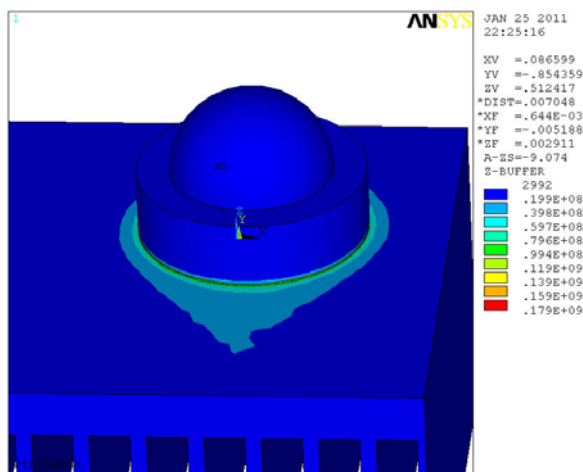
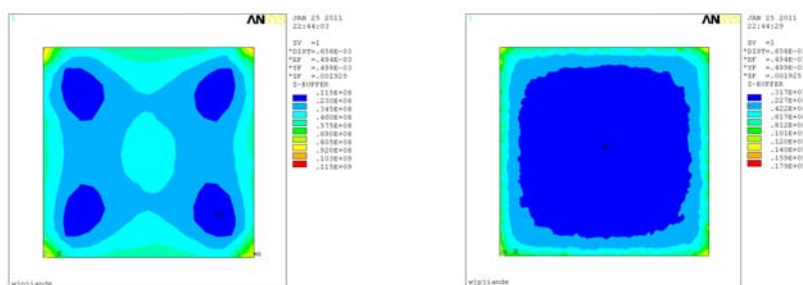


图 4.7 传统大功率 LED 器件阵列封装系统的等效应力云图

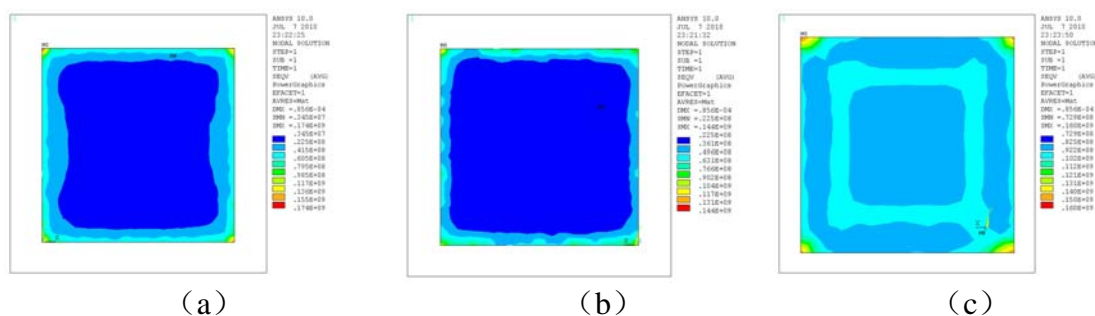


(a)

(b)

图4.8 (a)蓝宝石衬底的热应力分布 (b)GaN有源层的热应力分布

采用 Al 散热板结构散热的单芯片大功率 LED 器件阵列组合封装结构中蓝宝石衬底、GaN 有源层以及铜电路层的最大热应力分别为 174MPa, 144MPa 和 160MPa, 如图 4.9 所示。与 AlN 散热板结构相比, Al 散热板结构中各热界面层之间的热应力要偏高。如图 4.10 所示, 系统的最大热应力存在于导电绝缘层与 Al 散热板之间, 为 316MPa, 这主要是由于系统的结温偏高和不同材料间的热膨胀系数不匹配所致。AlN 散热板结构由于 AlN 的热膨胀系数低, 则能很好地降低界面层间的热应力。因此, 合理地选择 LED 封装材料能大大提高 LED 封装系统的热-机械可靠性, 降低系统的热应力, 避免翘曲和裂纹的产生。



(a)

(b)

(c)

图4.9 (a) 蓝宝石衬底的热应力分布(b) GaN有源层的热应力分布(c) 铜电路层的热应力分布

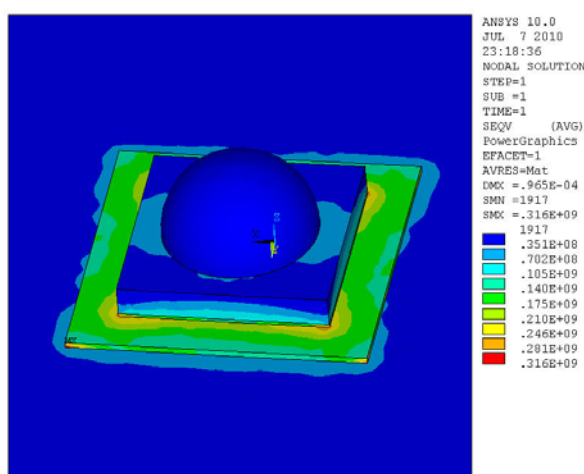


图 4.10 单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统的等效力云图 (AI 散热板)

### § 4.3 单芯片高功率 LED 器件热-机械材料参数优化

#### § 4.3.1 基于正交表的单芯片高功率 LED 器件材料参数组合设计

由 4.2 节热应力仿真结果可知, LED 芯片处存在比较大的应力分布, 容易造成芯片可靠性降低。芯片处的应力主要是由于 LED 器件各连接层间不同材料的热-机械性能参数不匹配所引起的。正交试验设计的目的是研究高功率 LED 器件芯片处应力随不同材料参数组合的变化趋势, 确定影响芯片处应力分布的因素主次关系, 并进行材料参数的优化选择, 以降低芯片处的最大等效应力, 提高芯片可靠性。

本文选用三因素三水平的正交试验设计方法设计试验, 选取的材料参数因素包括芯片衬底材料、芯片键合层材料以及热沉材料。具体参数如表 4.2 所示。

表 4.2 因素和水平配置表

因素 \ 水平	1	2	3
芯片衬底材料	蓝宝石	Si	SiC
芯片键合层材料	导热胶	Sn63Pb37	纳米银焊膏
热沉材料	Si	AlN	Cu

根据上述确定的试验因素及其水平, 选取等水平正交表  $L_9(3^4)$ 。本试验设计共有 9 种不同的结构参数组合, 对应的正交试验方案如表 4.3 所示。其中, 所选正交表中存在有空白列, 可用作后续方差分析及 F 检验中的误差项。

为了使不同材料参数组合可以在同等温度载荷条件下进行应力的对比, 本文针对上述 9 种不同材料参数组合下的高功率 LED 器件进行热循环载荷条件下的仿真计算。其中, 由于芯片有源层的厚度很薄, 为了简化模型, 直接把芯片衬底等效成整块芯片

键合到热沉上，其余封装结构及材料参数与 4.2 节中的模型保持一致。

表 4.3 正交试验设计方案

试验号	芯片衬底材料	芯片键合层材料	热沉材料	空列
1	蓝宝石	导热胶	Si	1
2	蓝宝石	Sn63Pb37	AlN	2
3	蓝宝石	纳米银焊膏	Cu	3
4	Si	导热胶	AlN	3
5	Si	Sn63Pb37	Cu	1
6	Si	纳米银焊膏	Si	2
7	SiC	导热胶	Cu	2
8	SiC	Sn63Pb37	Si	3
9	SiC	纳米银焊膏	AlN	1

本文热循环加载选择温度循环测试条件为 G (温度范围 40℃~125℃), 初始载荷温度为 25℃, 升降温速率选择为 10℃/min, 高温、低温保持时间为 10min, 共模拟加载 5 个温度循环周期, 总历时 15900s。最后读取芯片上的等效应力最大值, 试验结果如表 4.4 所示。

表 4.4 试验因素配置下的试验结果

试验号	最大等效应力/MPa
1	467
2	263
3	517
4	325
5	283
6	180
7	223
8	232
9	282

### § 4.3.2 试验结果处理与分析

#### 1. 极差分析

极差分析法是根据数理统计方法计算出正交试验设计中每个影响因素的极差值, 由此确定影响因素的主次顺序和各因素的最佳水平组合。极差计算公式如下<sup>[49]</sup>:

$$Y_{ij} = T_{ij} / r \quad (4-3-1)$$

$$R_j = Y_{j(\max)} - Y_{j(\min)} \quad (4-3-2)$$

其中,  $i$  为水平数,  $j$  为因素个数,  $r$  为某因素同一水平重复试验次数,  $Y_{ij}$  为第  $j$  列  $i$  水平所对应的试验结果平均值,  $T_{ij}$  为正交表中第  $j$  列  $i$  水平的试验结果之和,  $Y_{j(\max)}$  为第  $j$  列中的最大值,  $Y_{j(\min)}$  为第  $j$  列中的最小值,  $R_j$  为第  $j$  列的极差值。

根据表 4.4 所得的系统结温进行极差分析, 结果如表 4.5 所示。

表 4.5 芯片等效应力极差分析结果

	芯片衬底材料(A)	芯片键合层材料(B)	热沉材料(C)	空白列(E)
$Y_{1j}$	415.667	338.333	293	344
$Y_{2j}$	262.667	259.333	290	222
$Y_{3j}$	245.667	326.333	341	358
$R_j$	170	79	51	136
极差顺序	1	3	4	2

其中,  $Y_{1j}$ 、 $Y_{2j}$ 、 $Y_{3j}$  分别代表三个水平数下各个不同因素的试验结果平均值,  $R_j$  代表各个不同因素的极差值。由表中可知, LED 器件中各因素对芯片最大等效应力的影响程度依次为: 芯片衬底材料>芯片键合层材料>热沉材料。

图 4.11 为 3 个设计因素的影响趋势。从图中可以看出, 各参数组合下, 系统结温最小值对应的最优结构参数组合为  $A_3B_2C_2$ , 即芯片衬底材料为 SiC, 芯片键合层材料为 Sn63Pb37, 热沉材料为 AlN。

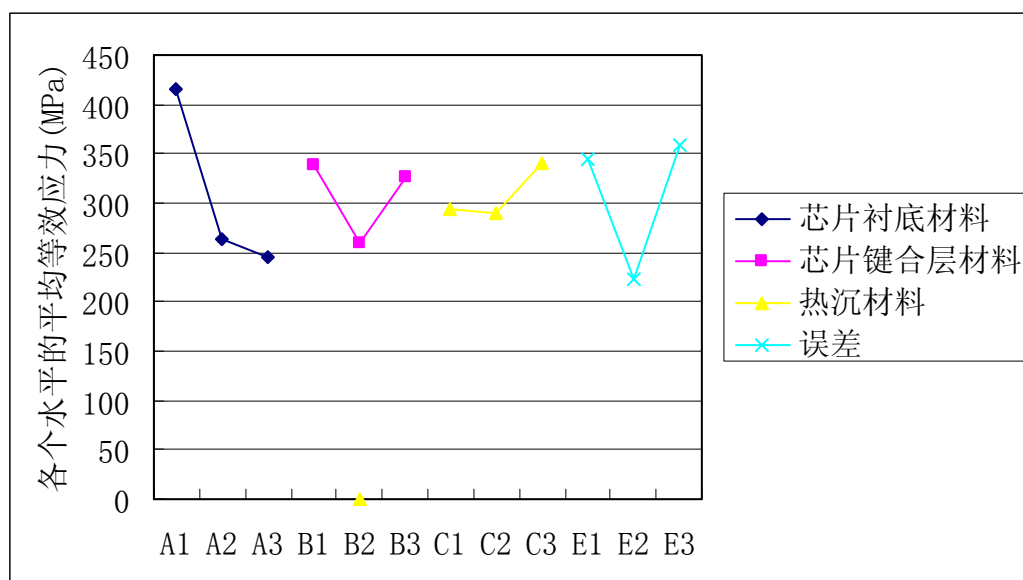


图 4.11 正交试验中各因素的影响趋势

## 2. 方差分析

采用极差分析方法只能得到各因素对试验指标影响的相对大小, 并不能确定每个因素对试验指标的影响是否显著, 以及显著性的大小<sup>[50]</sup>。方差分析作为分析试验数据的一种方法, 相比极差分析, 具备误差分析能力, 可以估计误差大小, 能把试验条件

的改变与由试验误差二者所引起的数据波动区别开来,以判断各个因素对试验结果的影响是否显著。

表 4.6 方差分析表

方差来源	偏差平方和	自由度	F 值	临界值	显著性
A	52598	2	1.567	$F_{0.05}(2,2)=19.00$	不显著
B	10874	2	0.324	$F_{0.01}(2,2)=99.00$	不显著
C	4914	2	0.146		不显著
误差 (E)	33576	2			

方差分析结果如表 4.6 所示,由分析结果可知,三个因素的 F 值都小于  $F_{0.05}(2,2)$ ,均为不显著因素。

#### § 4.4 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统热仿真分析

根据第三章中所设计的各部件尺寸大小,所建的封装结构模型如图 4.12 (a) 所示,考虑到整体系统结构的对称性和复杂性,为了提高计算速度,我们只取其 1/4 结构进行模拟分析。

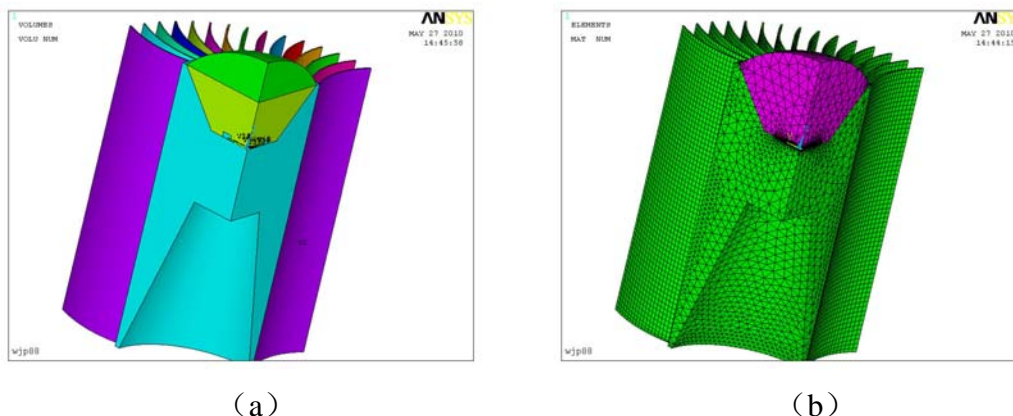


图 4.12 (a)1/4 模型结构;(b)划分网格后的 1/4 模型

仿真模拟中选用的单元类型是 SOLID90,整个 1/4 模型包含有 550000 个单元。划分网格后的实体模型如图 4.12 (b) 所示。

芯片的 PN 结是发热源,即 GaN 有源层 ( $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.005\text{mm}$ ),每颗芯片均产生 1W 的热量,所以还需要在 GaN 有源层上加载生热率,每颗芯片产生的生热率大小为  $2 \times 10^{11} \text{ W/m}^3$ 。由于系统属于自然对流换热,所以需要在散热板表面加载空气对流换热系数,其中空气对流换热系数设定为  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,环境温度及系统的初始温度设定为  $25^\circ\text{C}$ 。

模型稳态温度场分布如图 4.13 所示。系统中芯片的温度最高,为  $70.717^\circ\text{C}$ ,系统中的最低温度出现于透镜顶部,为  $46.855^\circ\text{C}$ 。由公式 (3-1-4) 可以得出系统的总热阻为:

$$R_{\theta total} = (T_J - T_A) / P_{total} = 2.406 \text{K/W}$$

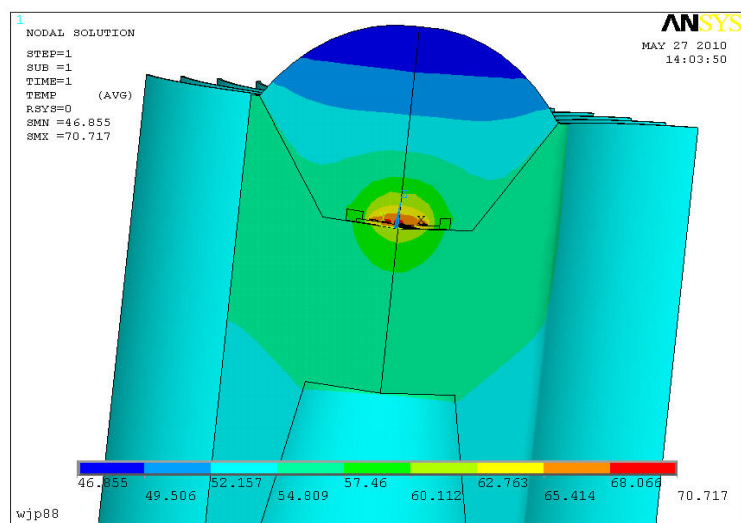


图 4.13 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统温度场分布

透镜处的温度梯度要大于其他部件处的温度梯度，这说明芯片产生的热量主要通过热沉以及散热翅片传递到空气中，只有少部分热量通过透镜传递，这主要是因为热沉及散热翅片的热传导系数要远远高于透镜的热传导系数。如图4.14所示，太阳花散热翅片的总体温度分布均匀，温度梯度较低，这说明该散热翅片的散热性能良好、散热效率高、扩散热阻低。

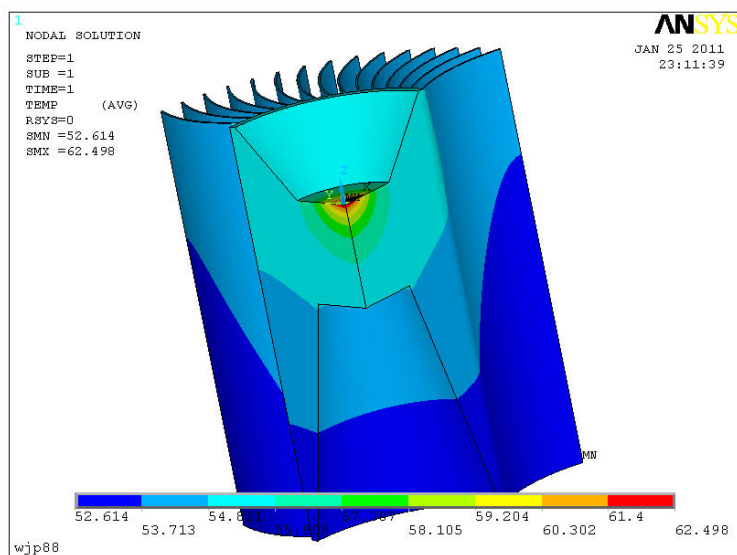


图 4.14 太阳花散热翅片的温度场分布

从系统的热阻及结温我们可以看出系统的散热性能良好，同时也证明了该封装系统结构设计的合理性。

## § 4.5 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统散热结构参数优化

### § 4.5.1 芯片衬底的优化

高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统中芯片的结构是由 GaN 有源层和蓝宝石衬底组成，但由于蓝宝石衬底导热系数低，在一定程度上影响了芯片的传热。为了提高系统的散热性能，我们用 Si 和铜衬底来代替蓝宝石衬底并同时进行了仿真模拟。如图 4.15 所示，用 Si 和铜衬底来代替蓝宝石衬底能很好地降低芯片的温度，其中用铜衬底结温下降了  $2.480^{\circ}\text{C}$ ，用 Si 衬底结温下降了  $1.757^{\circ}\text{C}$ 。与蓝宝石衬底相比，用 Si 衬底芯片热传导系数提高了  $104.1\text{W/mk}$ ，芯片结温下降了  $1.757^{\circ}\text{C}$ ；与 Si 衬底相比，用铜衬底热传导系数提高了  $239\text{W/mk}$ ，但是芯片结温只下降了  $0.723^{\circ}\text{C}$ 。这主要是由于用 Si 衬底来代替蓝宝石衬底所降低的热阻要远远大于用铜衬底来代替 Si 衬底所降低的热阻。对于整个封装系统来说，加大芯片的热传导系数所能降低的结温是有一个极限的，因此，我们要从芯片的成本、性能、可靠性等多个方面进行综合考虑，合理地选择芯片材料，使系统在综合性能方面达到最优化。

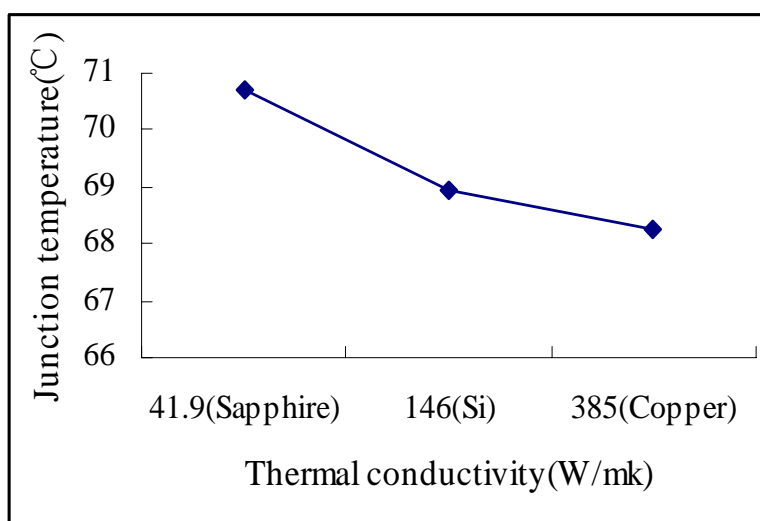


图 4.15 不同芯片衬底材料的对比分析

### § 4.5.2 芯片键合层的优化

芯片产生的热量主要是通过芯片键合层传导至热沉和外部散热器，因此芯片键合层导热系数的高低在很大程度上决定了系统热传导性能的好坏。如图 4.16 所示，当芯片键合层的材料为 Sn63Pb37 合金焊料和导热胶时，其所对应的芯片结温分别为  $70.717^{\circ}\text{C}$  和  $74.24^{\circ}\text{C}$ 。导热胶由于其导热系数很低，很大程度上阻碍了热量的传导。芯片键合层厚度的大小也会对芯片结温产生很大的影响，从图中可以看出，键合层的厚度越薄，芯片的结温越低。但从系统的机械可靠性方面考虑，芯片键合层太薄的话容易出现分层和裂纹，因此不建议过度地减薄键合层的厚度，一般应保持在  $0.01\text{mm}$

以上，以确保系统的机械可靠性。

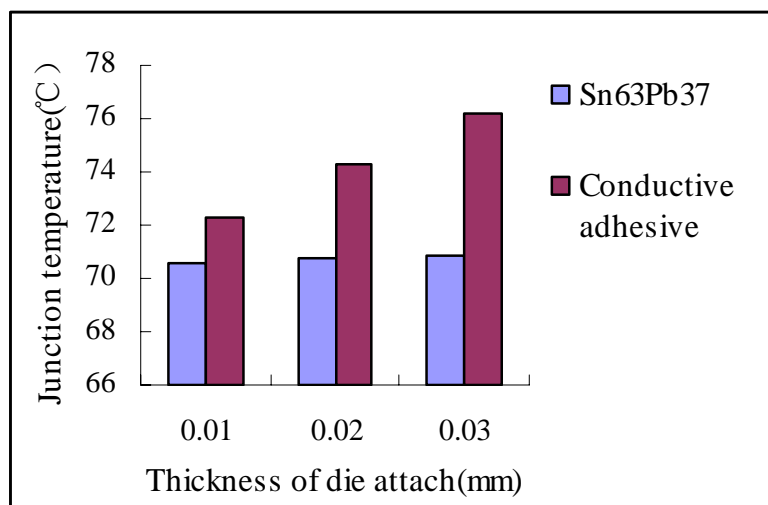


图 4.16 不同芯片键合层材料与尺寸的对比分析

### § 4.5.3 系统外部散热器结构参数优化

#### 1. 基于正交表的太阳花散热翅片结构参数组合设计

正交试验设计的目的是研究高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统结温随不同散热翅片结构参数组合的变化趋势，确定影响系统结温的因素主次关系，并进行结构参数的优化选择，以提高太阳花散热翅片的散热性能，降低系统结温。

影响太阳花散热翅片散热性能的因素很多，包括翅片结构参数和材料参数等，本文主要从结构参数这一因素来对太阳花散热翅片结构进行优化，具体包括翅片的高度、宽度、个数以及散热片中心柱的厚度这四个设计因素。每种因素选取三个水平。具体参数如表 4.7 所示。

表 4.7 因素和水平配置表

因素 \ 水平	1	2	3
	翅片高度 (mm)	50	60
翅片宽度 (mm)	15.535	16.535	17.535
翅片个数	48	56	60
中心柱厚度 (mm)	15	20	25

根据上述确定的试验因素及其水平，选取等水平正交表  $L_9(3^4)$ 。本试验设计共有 9 种不同的结构参数组合，对应的正交试验方案如表 4.8 所示。

表 4.8 正交试验设计方案

试验号	翅片高度	翅片宽度	翅片个数	中心柱厚度
1	50	15.535	48	15
2	50	16.535	56	20
3	50	17.535	60	25
4	60	15.535	56	25
5	60	16.535	60	15
6	60	17.535	48	20
7	70	15.535	60	20
8	70	16.535	48	25
9	70	17.535	56	15

在 4.3 节的温度场仿真计算中选用的空气对流换热系数为  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ，但由于不同翅片宽度和个数会造成散热翅片微槽横截面的水力直径不同，从而会对空气对流换热系数产生影响。空气对流换热系数的计算公式为<sup>[51]</sup>：

$$h = Nu k_f / D_h \quad (4-5-1)$$

其中  $D_h = 2W_c H_c / (W_c + H_c)$ ，为微槽横截面的水力直径， $W_c$  为微槽的宽度（这里  $W_c$  取两翅片中心之间的宽度）， $H_c$  为翅片宽度。  $Nu = 2.253 + 8.164[\alpha / (\alpha + 1)]^{1.5}$ ，为  $Nu$  数， $\alpha$  为微槽的高宽比， $\alpha = H_c / W_c$ 。  $k_f$  为空气的热导率。

按照上述正交试验设计方案，运用公式（4-5-1）计算出每一种方案所对应的空气对流换热系数，并用 ANSYS 进行稳态温度场仿真计算。空气对流换热系数及试验结果如表 4.9 所示。

表 4.9 试验因素配置下的试验结果

试验号	空气对流换热系数 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	系统结温 ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	3.9	87.319
2	4.6	81.874
3	5.0	74.134
4	4.7	75.912
5	5.0	70.717
6	4.0	83.177
7	5.0	67.696
8	4.0	80.483
9	4.9	67.162

## 2. 试验结果处理与分析

## (1) 极差分析

根据表 4.9 所得的系统结温进行极差分析，结果如表 4.10 所示。

表 4.10 系统结温极差分析结果

	翅片高度 (A)	翅片宽度(B)	翅片个数(C)	中心柱厚度(D)
$Y_{1j}$	81.109	76.976	83.660	75.066
$Y_{2j}$	76.602	77.691	74.983	77.582
$Y_{3j}$	71.780	74.824	70.849	76.843
$R_j$	9.329	2.867	12.811	2.516
极差顺序	2	3	1	4

由表中可知，散热翅片中各因素对散热翅片散热性能的影响程度依次为：翅片个数>翅片高度>翅片宽度>中心柱厚度。

图 4.17 为 4 个设计因素的影响趋势。从图中可以看出，各参数组合下，系统结温最小值对应的最优结构参数组合为  $A_3B_3C_3D_1$ ，即翅片高度为 70mm，翅片宽度为 17.535mm，翅片个数为 60，中心柱高度为 15mm。

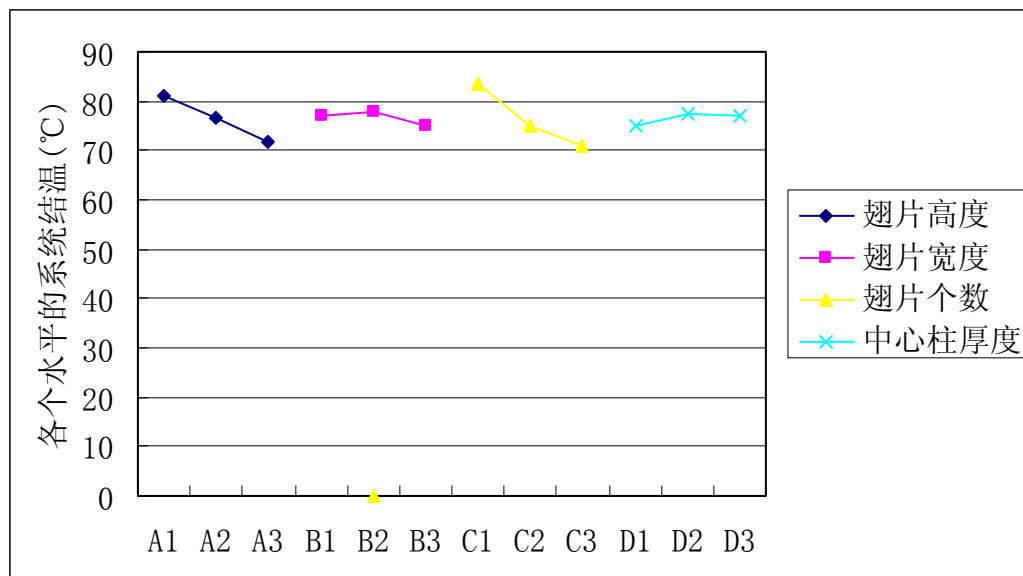


图 4.17 正交试验中各因素的影响趋势

## (2) 方差分析

本次正交试验选用四因素三水平，属于正交表各列均饱和情况下的方差分析，所以本正交表没有空白列用来做误差列。在方差分析中，如果没有误差平方和，理论上不能进行方差分析。此种情况下，有两种方法对误差平方和以及其自由度进行估计<sup>[52]</sup>：

1. 当正交表中有一个偏差平方和明显偏小时，可用该偏差平方和作为误差平方和，该偏差平方和所对应的自由度作为误差平方和的自由度；

2. 当正交表中没有一个偏差平方和明显偏小时，可将正交表各因素中几个最小的

偏差平方和相加作为误差平方和,将它们所对应的自由度相加作为误差平方和的自由度。

表 4.11 为方差分析计算表,由表可知,因素 B 和 D 所对应的偏差平方和明显偏小,所以取 B 和 D 的偏差平方和相加作为误差平方和,即  $Q_E = Q_B + Q_D = 23.396$ ,以便对试验数据进行方差分析。

表 4.11 方差分析计算表

	翅片高度 (A)	翅片宽度(B)	翅片个数(C)	中心柱厚度(D)
$Q_i$	130.586	13.360	256.491	10.036

方差分析结果如表 4.12 所示,由分析结果可知,就翅片个数的 F 值大于  $F_{0.05}(2,2)$ ,对结果的影响比较大,为显著因素,另外三个因素均为不显著因素。

表 4.12 方差分析表

方差来源	偏差平方和	自由度	F 值	临界值	显著性
A	130.586	2	11.163	$F_{0.05}(2,2)=19.00$ $F_{0.01}(2,2)=99.00$	不显著
B	13.360	2	1.142		不显著
C	256.491	2	21.926		显著
D	10.036	2	0.858		不显著
误差 (E)	23.396	4			

上述分析表明,通过调整散热翅片结构参数可以使散热翅片散热性能得到比较大的改善。由前面热阻网络计算可知,散热翅片最大热阻主要存在于空气对流热阻上,因此有效调整翅片个数可以大大改善空气对流换热系数,提高翅片散热性能。

综合上述分析,当 LED 芯片衬底为 Si,键合层材料为 Sn63Pb37,厚度为 0.02mm,散热器高度为 70mm,翅片宽度为 17.535mm,翅片个数为 60,中心柱厚度为 15mm 时的结构散热性能最好,可靠性最高。

## § 4.6 本章小结

本章主要是采用基于有限元理论的大型分析软件 ANSYS 对高功率 LED 照明系统进行热仿真分析并同时用正交试验设计进行结构、材料参数优化。首先介绍了稳态热分析和热应力分析的原理及其基本思想;接着对单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统的温度场分布、热应力场进行计算模拟并同时进行相关的对比分析及材料参数优化;最后对高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的稳态温度场分布进行模拟分析并对其系统散热结构进行优化。得出以下结论:

(1) 通过仿真分析,单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统与高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的热阻和结温分别为 (12.15K/W、73.602℃) 和 (2.406K/W、70.717℃),与热阻网络模型计算所得到的热阻和结温 (12.48 K/W、74.92℃) 与 (2.214

K/W、67.066°C) 非常接近。这也直接验证了热阻网络模型计算的准确性。

(2) 通过对比分析, 图 3.13 所示结构的高功率 LED 器件散热性能要优于传统高功率 LED 器件, Al 基板上导电绝缘层的导热系数很低, 导致 LED 器件上的热量不能迅速地传导至散热板上, 影响了系统的散热性能。

(3) 在热应力分析中发现, LED 芯片处存在比较大的热应力, 并且最大热应力通常存在于芯片的边角处, 这极易产生分层与翘曲。AlN 材料由于具有比较低的热膨胀系数, 能很好地与芯片等元件相匹配, 降低界面层间的热应力。通过正交试验设计, 对高功率 LED 器件的材料参数进行了优化, 研究结果表明各因素对芯片最大等效应力的影响程度为: 芯片衬底材料 > 芯片键合层材料 > 热沉材料, 得出的最优组合方案为: 芯片衬底材料为 SiC、芯片键合层材料为 Sn63Pb37、热沉材料为 AlN。

(4) 太阳花散热器结构紧凑, 扩散热阻低, 散热效率高, 与多芯片集成阵列封装器件相结合完全符合照明应用要求。在综合考虑各方面因素的同时, 针对芯片衬底、键合层材料、厚度、散热器高度以及翅片宽度等重要参数通过正交试验设计进行优化, 最后得出一组最优的数据, 即当 LED 芯片衬底为 Si, 键合层材料为 Sn63Pb37, 厚度为 0.02mm, 翅片高度为 70mm, 翅片宽度为 17.535mm, 翅片个数为 60, 中心柱高度为 15mm 时, 系统结构的散热性能最好, 可靠性最高。



## 第五章 全文总结

### § 5.1 结论

LED 照明工程是国家重点推广与积极扶持的国家级节能减排工程，LED 作为一种环保、节能、高效的新型照明光源，将取代传统照明光源成为通用照明领域的主导。但目前市场上的大部分高功率 LED 产品还存在着 LED 结温偏高，可靠性差，性价比低（成本高），光、电、色参数会随温度与时间的改变而较大漂移等一系列问题，还无法正式进入通用照明领域。本文主要针对高功率 LED 产品结温高、可靠性差这两个热点问题，开展了对高功率 LED 照明系统的热设计与热-机械可靠性分析。

本文围绕高功率 LED 照明系统的热设计与热-机械可靠性分析做了以下具体工作：

1. 在研究现有高功率 LED 的热设计及其封装技术的基础上，抽象 LED 的热模型，同时运用 T3Ster 瞬态热阻测试仪对高功率 LED 照明系统中的扩散热阻进行实验分析并同时测量相关热特性参数。并由扩散热阻实验分析得出：扩散热阻不仅与发热元件和散热翅片的有效接触面积有关，而且还和发热元件在散热翅片上的安装位置有关。合理地增加 LED 器件与散热翅片的有效接触面积及选择最优的安装位置可以有效降低系统的扩散热阻，提高散热器的散热效率。

2. 结合实验分析的结果及测量的相关热特性参数对单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统及高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统进行热结构设计及材料参数优化，最后运用热阻网络模型对单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统的热阻及结温进行计算分析。运用热阻网络模型计算求得的单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统与高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的热阻和结温分别为（12.48 K/W、74.92℃）和（2.214 K/W、67.066℃）。

3. 用 ANSYS 软件对单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统的温度场分布、热应力场进行仿真计算模拟并同时进行相关的对比分析。通过仿真分析，单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装系统的热阻为 12.15K/W，结温为 73.602℃，与热阻网络模型计算所得到的热阻（12.48 K/W）和结温（74.92℃）非常接近，这也直接验证了热阻网络模型计算的准确性。通过对比分析，图 3.13 所示结构的高功率 LED 器件散热性能要优于传统高功率 LED 器件，Al 基板上导电绝缘层的导热系数很低，导致 LED 器件上的热量不能迅速地传导至散热板上，影响了系统的散热性能。在热应力分析中发现，LED 芯片处存在比较大的热应力，并且最大热应力通常存在于元件的边角处，这极易产生分层与翘曲。通过正交试验设计，对高功率 LED 器件的材料参数进行了优化，研究结果表明各因素对芯片最大等效应力的影响程度为：芯片衬底材料 > 芯片键合层材料 > 热沉材料，得出的最优组合方案为：芯片衬底材料为 SiC、芯片键合层

材料为 Sn63Pb37、热沉材料为 AlN。

4. 最后对高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的稳态温度场分布进行模拟分析并对其系统散热结构进行优化。太阳花散热器结构紧凑, 扩散热阻低, 散热效率高, 与多芯片集成阵列封装器件相结合完全符合照明应用要求。通过仿真分析, 高功率 LED 多芯片集成阵列封装系统的热阻与结温 (2.406K/W、70.717°C) 与热阻网络模型计算所得的值 (2.214 K/W、67.066°C) 非常接近。在综合考虑各方面因素的同时, 针对芯片衬底、键合层材料、厚度、散热器高度以及翅片宽度等重要参数通过正交试验设计进行优化, 最后得出一组最优的数据, 即当 LED 芯片衬底为 Si, 键合层材料为 Sn63Pb37, 厚度为 0.02mm, 翅片高度为 70mm, 翅片宽度为 17.535mm, 翅片个数为 60, 中心柱高度为 15mm 时, 系统结构的散热性能最好, 可靠性最高。

## § 5.2 展望

单芯片高功率 LED 器件阵列组合封装结构可靠性高、扩散热阻小、有效热接触面积大, 能充分利用散热器的散热功能, 使之散热效率达到最大化, 适合于高光通量 LED 灯具 (如 LED 路灯) 的组合封装。太阳花散热器与多芯片集成阵列封装器件相结合能发挥其最大散热效率, 完全符合照明应用要求。本文用相关的理论方法和分析方法验证了该两种封装结构的可行性, 但由于理论计算过程与仿真分析过程中存在着部分的假设与模型简化, 造成分析结果与实际情形存在一定的偏差。由于客观试验条件和时间所限, 本文所做工作还远远不够, 尚有大量工作有待进一步加以探讨和解决, 主要体现在以下几个方面:

(1) 对高功率 LED 热阻网络模型进行更深入的研究与分析, 在研究扩散热阻的同时, 融入接触热阻的分析, 并结合不同环境因素对模型产生的影响等, 使理论模型与实际模型更加接近。

(2) 在分析热-光、热-机械等耦合机理的基础之上, 对高功率 LED 系统集成封装结构进行有限元耦合建模与仿真分析, 利用有限元软件和光学软件分别对封装结构的温度场分布、热应力场、光场分布进行计算模拟; 通过参数设计与试验设计 (DOE), 对 LED 系统集成封装结构进行优化设计, 最后得到高热导的高功率 LED 系统集成封装原型结构。

(3) 在获得上述系统封装原型结构的基础之上, 结合现行的高功率 LED 封装工艺, 以获取低热阻封装工艺和高取光率封装结构为导向, 提出一种与现有高功率 LED 封装工艺相兼容的新工艺路线, 封装高功率 LED 样件, 进一步进行光特性、热特性测试 (通过 T3Ster 热测试仪) 与可靠性试验 (加速寿命测试系统), 并进行验证分析, 解决当前高功率 LED 封装结构可靠性低、热阻高、光学性能差等问题。

## 参考文献

- [1] Multi-Year Program Plan FY'09-FY'15:Solid-State Lighting Research and Development.
- [2] Chi Wei-Hao, Chou Tsung-Lin, et al. Analysis of thermal performance of high power light emitting diodes package[C]. //10th Electronics Packaging Technology Conference, 2008: 533-538.
- [3] Wang Nan, Wang Chang-hong, et al. Numerical Study on Thermal Management of LED Packaging by Using Thermoelectric Cooling[C]. //2009 International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging, Beijing, 2009: 433-437.
- [4] 贾学姣. 半导体发光二极管可靠性研究及热特性分析[D]. 北京工业大学, 2009:1-2.
- [5] 陈华. 8W 白光 LED 多芯片组件的热分析[D]. 华中科技大学, 2007:1-3.
- [6] Jeong Park, Moowhan Shin, Chin C. Lee. Measurement of temperature profiles on visible light-emitting diodes by use of a nematic liquid crystal and an infrared laser[J]. OPTICS LETTERS, 2004, 29(22):2656-2658.
- [7] Robert V. Steele. High-brightness LED market overview[C]. //Proceeding of SPIE, 2001, 4445:1-4.
- [8] Li Dongmei, Zhang G.Q, et al. Numerical Simulation on Heat Pipe for High Power LED Multi-Chip Module Packaging[C]. //2009 International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging, Beijing, 2009:393-397.
- [9] Daniel A.Steigerwald, Jerome C.Bhat, Dave Collins, et al. Illumination with Solid State Lighting Technology[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(2):310-320.
- [10] 廖志凌, 阮新波. 半导体照明工程的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9):106-111.
- [11] Arik M, Petroski J, Weaver S. Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications: light emitting diodes[C]. //ASME/IEEE International Packaging Technical Conference. Hawaii, 2001.
- [12] 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.

- [13] Carl Zweben. Advances in LED packaging and thermal management materials[C]. //Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2008, 6910(18):1-10.
- [14] Hu Jianzheng, yang Lianqiao, et al. Thermal and Mechanical Analysis of High-Power Light-Emitting Diodes with Ceramic Packages[C]. //Collection of Papers Presented at The 13th International Workshop on THERMAL Investigation of ICs and Systems, 2007:77-81.
- [15] 钱可元, 郑代顺, 罗毅. GaN 基功率型 LED 芯片散热性能测试与分析[J]. 半导体光电. 2006, 27(3): 236-239.
- [16] 通孔垂直结构的LED. <http://www.cnLEDw.com/technique/detail-6829.htm>.
- [17] Lan Kim, Moo Whan Shin. Thermal analysis and design of high power LED packages and systems[C]. // Proc. of SPIE, 2006 , 6337:63370U-1-63370U-9.
- [18] Jung Kyu Park, et al. A Suggestion for High Power LED Package Based on LTCC[C].//2006 Electronic Components and Technology Conference, 2006:1070-1075.
- [19] [www.laminaceramics.com](http://www.laminaceramics.com).
- [20] Thermal design considerations for high-power LED systems. <http://embedded-systems.com/design/197006914>.
- [21] Vetrovec John, Litt Amardeep. High-Performance Heat Sink for Solid-State Lighting[C]. //Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009, 7231:72310Q-1-72310Q-9.
- [22] Jim Balthazar. A Comparison of Passive and Active Cooling Effectiveness for LED Luminaire Designs[C]. //6th China International Forum on Solid State Lighting, Shenzhen, 2009:267-269.
- [23] 陈明祥, 罗小兵, 马泽涛, 刘胜. 大功率白光LED封装设计与研究进展[J]. 半导体光电, 2006, 27(6):653-658.
- [24] Armin Veitl. 利用全新的陶瓷方法简化 LED 散热设计. <http://www.china-led.net>.
- [25] 齐昆, 陈旭. 大功率LED封装界面材料的热分析[J]. 电子与封装, 2007, 7(6): 8-12.
- [26] 苏达. 大功率 LED 封装散热性能的若干问题研究[D]. 浙江大学, 2008:1-2.
- [27] Shyu R. F, Yang H, Liao J-Y. Influence of Truncated Micro-pyramid Cavity for LED Packaging Heat Dissipation[J]. Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, 2009:153-156.
- [28] 李世玮, 张荣. LED阵列封装的晶圆级封装方法及其制造的LED封装器件. 中国

- CN200810177502.6[P]. 2009-05-20.
- [29] Sheng Liu, TlmLin, Xiao bing Luo, et al. A Microjet Array Colling System For Thermal Management of Active Radars and High-Brightness LEDs[C]. //Electronic Components and Technology Conference, 2006: 1634-1638.
- [30] 刘胜. 大功率白光LED封装技术与发展趋势. <http://www.alighting.cn>.
- [31] <http://www.sslchina.org>.
- [32] 陈元灯. LED制造技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2007:10-100.
- [33] <http://www.china-led.net>.
- [34] 周波. 大功率白光 LED 封装技术研究[D]. 华中科技大学, 2007:30-32.
- [35] Hu Jianzheng, yang Lianqiao, et al. Thermal and mechanical analysis of delamination in GaN-based light-emitting diode packages[J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 28(1):157-161.
- [36] 杨清德, 康娅. LED 及其工程应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007: 15-186.
- [37] Zhou L, Epler J E, Krames M R, et al. Vertical injection thin-film Al- GaN/AlGaIn multiple-quantum-well deep ultraviolet light-emitting diodes[J]. Appl. Phys.Lett . , 2006 , 89 :111-113.
- [38] 彭晖. 垂直结构的氮化镓基 LED. <http://www.china-led.net>.
- [39] 樊晶美, 王良臣, 刘志强. 表面粗化对 GaN 基垂直结构 LED 出光效率的影响[J]. 光电子·激光, 2009, 20(8):994-996.
- [40] <http://www.neopac-opto.com>.
- [41] Rong Zhang, Shi-Wei, Ricky Lee. Wafer Level Encapsulation Process for LED Array Packaging[C]. International Conference on Electronic Materials and Packaging, 2007.
- [42] 李华平, 柴广跃, 彭文达, 牛憨笨. 大功率 LED 的封装及其散热基板研究[J]. 半导体光电, 2007, 28(1):47-50.
- [43] 姬文飞. 大功率 LED 灯具散热系统的设计与研究[D]. 上海交通大学, 2009:13-15.
- [44] 姚仲鹏, 王瑞君, 张习军. 传热学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1995. 12: 98-168.
- [45] EIA/JEDEC Standard No. 51-1.
- [46] Seri Lee. Calculating spreading resistance in heat sinks[J]. Electronics-cooling, 1998, 4(1).
- [47] Song S, Lee S, and Au V. Closed-Form Equation for Thermal Constriction/Spreading Resistances With Variable Resistance Boundary Conditions[C]. //IEPS Conference, 1994:111-121.

- [48] 张朝晖. ANSYS 热分析教程与实例解析[M]. 中国铁道出版社, 2007:10-60.
- [49] 杨德. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [50] 吴兆华, 黄春跃. 基于焊点形态预测与塑性应变计算的工艺参数对 QFP 焊点可靠性影响分析[J]. 塑性工程学报, 2006, 13 (6): 103-109.
- [51] 邵宝东, 孙兆伟, 王丽凤. 热阻网络模型在微槽冷却热沉优化设计中的应用[J]. 吉林大学学报, 2007, 37(6): 1263-1267.
- [52] 何少华, 文竹青, 娄涛. 试验设计与数据处理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.

## 致谢

本论文的整体工作是在导师潘开林教授无微不至的关心和指导下顺利展开并完成的。就读研究生三年来，潘老师科研学习上的严格要求和生活中的悉心关怀始终激励、温暖着我，使我度过了一段有意义的人生旅程。导师深厚渊博的学识、高瞻远瞩的眼光、清晰敏锐的思维、严谨求实的作风，使我受益匪浅。他诲人不倦的高尚情操和非凡的人格魅力深深影响着我，使我懂得了很多做人、做事的道理。正是由于潘老师的启发式指导及提供的调研、实习、参与科研项目和参加国际会议等机会，使我具备了较强的独立科研能力。值此论文完成之际，谨向敬爱的潘老师表达最诚挚的谢意和最崇高的敬意！

感谢论文完成过程中给予我热情指导和帮助的林大川老师、邱伟阳师兄和袁超平师兄，谢谢你们！

感谢论文撰写过程中，刘静、任国涛、朱玮涛和黄静等同学给予的鼓励和帮助！

感谢朝夕相处的实验室兄弟姐妹们，和才华横溢的你们交流使我度过了愉快而充实的研究生生涯。

感谢我挚爱的父母及家人对我一直以来的关怀和支持，使我得以顺利毕业。

特别感谢为本论文送审、评阅和答辩付出了辛勤劳动的各位专家和老师们！

最后，再次感谢所有帮助过我的朋友们！

祝大家身体健康，开心快乐每一天！

## 作者在攻读硕士期间主要研究成果

1. **Jiaopin Wang**, Kailin Pan, Jing liu, Weitao Zhu, “Numerical Study on Thermo-mechanical Analysis of LED Lighting System by Using Ceramic Materials”, *Proc IEEE 2010 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, Xi’an, China. (EI 收录)
2. Kailin Pan, **Jiaopin Wang**, Jing Liu, Guotao Ren. “Numerical Analysis for Thermal Performance of High Power Multi-chip LED Packaging”, *Advanced Materials Research*, 2010, 139-141: 1433~1437.