

文章编号:1673-9981(2010)04-0343-05

LED封装中热沉及热电制冷器材料的研究进展*

钟达亮, 秦红, 王长宏, 肖泽成

(广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006)

摘要:在深刻分析热沉和热电制冷散热机理的基础上,结合国内外学者对两种散热器件的理论分析,详细描述了热沉及热电制冷器应用于LED封装上的研究进展.通过建立理论热模型及运用数值模拟的方法,研究材料因素对散热性能的影响.在材料的应用上,对热沉中的Al/SiC材料及热电制冷器中的PbTe晶体材料进行实验研究.指出热沉及热电制冷器的优化不仅要考虑内部材料和几何形状,更要考虑热沉、热电制冷器和风扇等外部组合情况.

关键词:发光二极管(LED);材料;热沉;热电制冷器;优化

中图分类号: TN305.94 **文献标识码:** A

LED(发光二极管)照明,是一种半导体固体发光器件.与传统光源一样,固态照明光源在工作期间由于电流在二极管中流动而产生热量,只要电流连续流动,热量就不断产生^[1].对于高亮度LED而言,需要消耗更大的电功率以驱动LED,其结果是带来更大的电流流经LED.而目前LED的发光效率依然较低,例如绿光等的发光效率只有30%~40%,有接近60%~70%的电功率转化成了热量并从LED芯片中散发出去^[2].若以典型的大功率LED来计,其芯片的表面积约1mm²,而其总的功率消耗为1W,LED的平均发光效率为20%,由此可知LED芯片处的热流密度能够达到80W/cm²,随着LED功耗的增大,热流密度显然将会超过80W/cm²^[3].高热流密度将造成结点温度的升高.与白炽灯可以工作在1000℃下不同,LED器件的结点温度必须在125℃以下^[4].高的结点温度将会给LED带来量子效率降低、发光效率降低、峰值波长偏移和使用寿命严重缩短^[5]等不良影响.

为获得LED工作的可靠性和最佳性能表现,合理有效的热管理是重要的,也是完全必需的.从高温点往低温点的传热主要包括三种方式,导热、对流和辐射.从大体上来讲,将近90%甚至更多的热能通过

导热方式从LED芯片直接散发出去,而通过辐射散发出去的热量很少^[6].对于整个系统与外界空气而言,热对流是一个重要的传热方式,它不仅可以在自然条件下也可以发生在强迫条件下.作为高效率光源,LED的热管理要求使用能耗少甚至无额外能耗的散热方法.尽管如此,大功率封装光源不断增加的热负荷使得仅靠这种方法来散热难以达到理想的效果,因此往往辅以风扇,与热沉一起使用.为满足LED封装中尺寸小、响应时间快的要求,热电制冷将是一个理想的热管理方法^[7].热电制冷设备能够与LED封装良好结合并且可以使LED保持恒定温度,因为热电制冷片的尺寸可以做得很小并且具有快的响应时间,如今,热电制冷器正紧跟大功率LED的发展步伐.

对于不同功率的LED器件而言,其芯片产生热的热流密度有大有小,为控制其结点温度均需采用一定的散热方式来实现良好的热管理.热沉和热电制冷器这两种散热设备具有的不同的散热性能正好迎合了不同功率LED散热的需要,从经济性出发,通过理论和实验的方法可以分析得出适合不同功率等级下LED的热管理方法.

收稿日期:2010-10-13

*基金项目:广东工业大学校级博士启动基金(405095237)

作者简介:钟达亮(1986-),男,江西吉安人,硕士研究生.

1 LED封装中热沉的研究进展

在导热、对流和辐射三种基本传热方式中,每一种方式的传热热量都与传热面积 A 成正比,所以增大传热面积是提高传热量的一种有效途径^[8]. 在电子设备封装热管理中,为了增大散热面积,采用了各种形式的热沉. 具有一定形状、尺寸的热沉也广泛用于 LED 的封装散热.

1.1 热沉散热热阻理论

如图 1 所示,有热流量大小为 Φ_0 的热流流经热沉底部,由底部经导热过程进入根部,在根部分流成两股热流 Φ_1 和 Φ_2 分别经根部与环境空气进行对流、热交换及经肋片导热最终经肋片侧面对流换热流入环境中. 对应于图 2 展示的是热沉肋片部分的热阻网络模型.

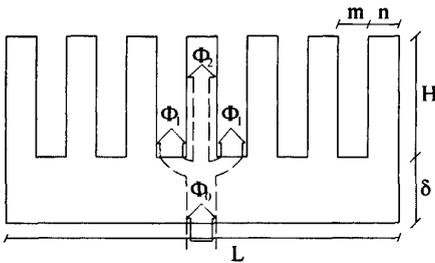


图 1 热沉散热热流示意图

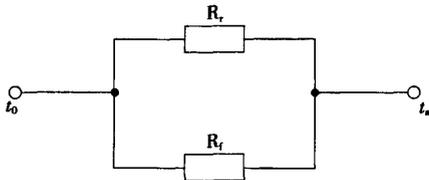


图 2 肋片部分的热阻网络模型

因热沉底座侧面面积远小于底部横截面积,可略去从侧面散去的热量,即热量全部经导热进入肋片根部及肋片侧面;肋片表面上的换热热阻 $1/h$ 远远大于肋片中的导热热阻 δ/λ ,因而在等高度的截面上肋片温度可认为是均匀的;肋片顶上可视为绝热;材料的导热系数 λ 、表面传热系数 h 以及沿肋高方向的横截面积 A . 均为常数. 根据以上简化,所建

模型为一维稳态导热模型,肋片的等效热阻:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_f}} \quad (1)$$

式(1)中, R_r 为肋片根部散热部分的热阻, K/W; R_f 为肋片侧面部分散热的热阻, K/W.

1.2 热沉研究进展

James M. Fusaro^[9]等人研究了 Al/SiC 材料,该材料具有低的热扩散性即低的热应力、高硬度、低密度和高导热性等特点. Al/SiC 作为热沉材料用于高功率混合封装,网状铸造的 Al/SiC 加强了热交换器与封装本身的结合. 在热沉与其他组件间结合的优化上, Farhad Sarvar 等人^[10]的研究表明, Al/SiC 基板具有低密度,低热膨胀系数和高热导率等特点,热沉翅片直接安装在基板上可以减轻重量; Maurice F. Holahan^[11]在对热沉与风扇组合的研究结果表明,在规定的空间位置上,当翅片的几何形状固定时,获得最大的系统热导率的方法是使风扇和热沉在体积上达到平衡,即当翅片数量增加时必须增大风扇直径才有效,只有同时考量风扇的体积才能在最高翅片热导率或者限定体积下的最大热沉效率层面上对热沉进行优化. Puqi Ning^[12]等人介绍了一种优化模型,包括热沉、风扇及流道,该模型能够准确模拟热沉-风扇散热系统的性能表现. 并在此基础上发掘了优化步骤用以获得热沉-风扇冷却系统的最小重量. Amit Shah 等人^[13]在热沉的整体优化上,采用沿高度方向切除中间部分肋片的方法形成高度递减可以减小压差阻力,减小压力降.

2 LED封装热管理中的热电制冷器

2.1 热电制冷器的工作原理

热电制冷主要是帕尔贴效应在制冷方面的应用. 实用的热电制冷装置是由热电效应比较显著、制冷效率比较高的半导体热电偶构成(如图 3 所示). 把一只 p 型半导体元件和一只 n 型半导体元件联结成热电偶,接上直流电源后,在接头处就会产生温度和热量的转移. 在上面的接头处,电流方向是从 n 流向 p,温度下降并且吸热,这是冷端;而在下面的接头处,电流方向是从 p 流向 n,温度上升并且放热,这是热端.

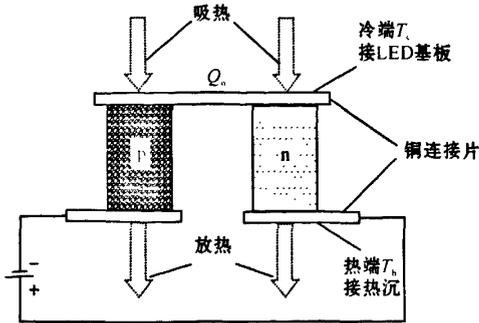


图3 热电制冷原理图

2.2 热电制冷器的研究进展

Sung Ki Kim 等人^[14]对一种采用热电制冷的大功率LED阵列封装模块的散热性能进行了研究。结果表明,热电制冷器能显著降低LED的工作温度,与不采用热电制冷器相比,结点温度降低了36%以上,但热电制冷器应用于电子芯片的散热尚有一些急需改进和突破的地方,提高热电材料的制冷效率、优化热电冷却器的运行工况以及合理结合其它散热方式是热电冷却电子芯片研究的重点^[15]。Jen-Hau Cheng^[16]等人运用硅片热电制冷器对大功率LED进行散热设计,热电制冷器冷面接导热材料,热面接热沉,通过测量半导体二极管的正向偏压降来得到LED结点温度,测试结果表明,采用12块热电制冷片制成的制冷器能使热电制冷器冷侧与周围环境的温差达到11.5℃。

在热电材料的研究方面,Jose. M^[17]的研究表明,在热电半导体材料中,热电能、导电性和导热性归根结底是与载流子浓度有关,载流子浓度可由不纯度控制。因此,可通过优化载流子浓度来达到最大转换效率的目的。Z. Dashevsky 等人^[18]对PbTe晶体的研究表明,热电制冷的转换效率由优值Z来评价,n型PbTe掺杂钢的合金已经被证明具有好的热电性能。但在温度50~600℃下,掺杂碘的同类型PbTe晶体能够获得比分级n型掺杂钢的PbTe晶体高出12%的转换效率。Gael Sebald 等人^[19]对热电材料转换效率的研究表明,无论材料具有何种特性,其热电转换效率在理论上均能达到卡诺循环的效率,尽管如此,在实际中热电转换效率却受材料限制。

0.75Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.25PbTiO₃,SSH_i(逆变系数为0.8)是能达到高于卡诺循环效率50%的

热电材料。Y. Gelbstein^[20]将p型锡镉化铅合金应用在50~600℃的热电制冷领域,通过在Pb_{1-x}Sn_xTe中改变混合物成分来控制载流子浓度进而优化热电制冷的性能。在Pb_{0.5}Sn_{0.5}Te中混合其他不同水平的锡集中可以降低载流子浓度。随着掺杂浓度由0.5%到0.1%再到0.03%,功率因数及热电优值系数能够达到最大,使不同温度区域内的热电转换效率提高。通过电沉积人工合成的纳米热电材料具有低成本、接近室温操作,调节材料特性的特点。Feng Xiao 等人^[21]研究了热电薄膜的电沉积方法以及Bi, Bi_{1-x}及Bi₂Te₃的纳米材料。

在热电制冷散热设计方面,Todd Wey 等人^[22]基于有限元理论解决三维Navier-Stokes方程用商业固体模型软件CFD模拟热电制冷器的性能。在此次设计中,稳流和瞬间流同时涉及到,设计包括以下内容:1)计算TEC的设计冷却量;2)对热沉热阻、风扇和空气管道热阻进行计算及优化;3)TEC设计,使用Marlow的热电模块内部软件得到优化后的TEC。该软件使用基本的热电方程,使用Marlow特有的热电材料特性和其它基本的TEC组件特性来优化TEC性能。

在热电制冷器参数及其测量的研究上,W. SE-IFERT 等人^[23]通过建立热电制冷器的一维稳态热分析模型研究相对电流密度 $u(T)$ 这一参数对制冷量及制冷效率的影响关系,结果表明,相对电流密度为不同类的TE设备的优化提供了一个新的参数,兼容性概念提及并应用到功能级配材料上,成功演绎了 $u(T)$ 的微分方程,建立了整体效率关于电流密度的函数。A. Chakraborty 等人^[24]讨论在给定温差下通过单一级冷却单元测试得到冷却能力和能效比之间的关系。热电设备的性能用经典的温度-熵关系来描述。在热电制冷器中汤姆森热被首次应用作为性能评价的一部分。研究结果表明,热电制冷器的冷端对总的耗散贡献估计在5%~7%。

3 结 语

(1) 在低的对流换热系数下LED的主要热阻来自于封装、热界面材料和环氧绝缘层。为了不影响光通量,应将焦点集中在提供最大的对流换热效率上,用热沉和热电制冷组合冷却是值得考虑的有效措施。

(2) 在强化传热方面,应优先采用增大换热面

积的方法,在材料的选用上使用铝片就足够了.在设计高性能热沉方面,最主要的是理解主要的系统规定参数如体积和压力的使用极限.热沉的优化应同时考虑风扇对热沉热导率的影响,风扇直径过大,热沉空间不够;风扇直径过小,由于在风扇附近存在集中流,热沉性能会受到限制.

(3) 热电制冷器的热电转换效率受材料限制,通过电沉积方法制成的纳米热电材料具有成本优势,较大程度上改善了热电材料的热电转换效率.采用模拟工具对热电制冷器进行性能评价及优化可以大大节约时间,降低成本.热电制冷器模型的建立是关键,该模型既包括材料的电流、电压等电领域模型也包括温度、功率等热领域模型.

参考文献:

- [1] LIU Shu-ping, XU Tie-jun. The radiation scheme design of solar energy LED lighting system based semiconductor refrigeration technology[J]. Control & Automation, 2008;276-278.
- [2] LIU Chun-kai, DAI Ming-ji, YU Chih-kuang, et al. High efficiency silicon-based high power LED package integrated with micro-thermoelectric device [C]. IM-PACT, 2007;29-33.
- [3] ARIK M, PETROSKI J, WEAVER S. Thermal Challenges in the future generation solid state lighting applications; Light Emitting Diode[J]. Inter Society Conference on Thermal Phenomena, 2002;113-120.
- [4] ARIK M, BECKER C, WEAVER S, et al. Thermal management of LEDs; package to system[C]. Proceedings of SPIE, 2004,5187;64-75.
- [5] NARENDRAN N, GU Y. Life of LED-based white light sources[J]. IEEE/OSA Journal of Display Technology 1, 2005;167-170.
- [6] PETROSKI J. Spacing of high-brightness LEDs on metal substrate PCB's for proper thermal performance[C]. Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems- Proceedings of the Intersociety Conference, Las Vegas, NV; [s. n.],2004; 507-514.
- [7] LIU Chun-kai, DAI Ming-ji, YU Chih-kuang, et al. High efficiency silicon-based high power LED package integrated with micoro-thermoelectric device[C]. IM-PACT, New Jersey, USA;IEEE,2007;29-33.
- [8] YU Jian-zu, GAO Hong-xia, XIE Yong-qi. Thermal design and analysis techniques of electronic equipment [M]. Beijing; Beihang University Press, 2008;20-30.
- [9] JAMES M. F, RODRIGUEZ P. Computational fluid dynamic and heat transfer analysis of an Al/Sic IGBT power hybrid package [C]. 1997 International Symposium on Advanced Packaging Materials, New Jersey, USA;IEEE, 1997;169-172.
- [10] FARHAD S, Whalley DC. Thermal design of high power semiconductor packages for aircraft electronic systems[C]. 1999 The Institution of Electrical Engineers, London; Institution of Electrical Engineers, 1999;1-6.
- [11] HOLAHAN M F. Fin, Fan, and Form: Volumetric Limits to Air-side Heatsink Performance[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005,28 (2);255-262.
- [12] NING Pu-qi, LEI Guang-yin, WANG F. Selection of heatsink and fan for high-temperature power modules under weight constraint[C]. IEEE, New Jersey, United States; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008;192-198.
- [13] SHAH A, SAMMAKIA B G, SRIHARI H, et al. A numerical study of the thermal performance of an impingement heat sink—Fin shape optimization [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2004,27 (4);710-717.
- [14] KIM S K, KIM S Y, CHOI Y D. Thermal performance of cooling system for red, green and blue LED light source for rear projection TV[C]. IEEE, New Jersey, United States; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006;377-379.
- [15] WANG Chang-hong ZHU Dong-sheng. Research progress on thermoelectric cooling technology applied in electronic packaging thermal management[J]. Electric Components & Materials, 2008, 27(11); 4-7.
- [16] CHENG Jen-hau, LIU Chun-kai, CHAO Yu-lin, et al. Cooling Performance of silicon-based thermoelectric device on high power LED[C]. 2005 International Conference on Thermoelectrics, New Jersey, United States; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2005;53-56.
- [17] BORRAGO J M. Carrier concentration optimization in semiconductor thermoelements[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1963, 10(2); 103.
- [18] DASHEVSKY Z, GELBSTEIN Y, EDRY I, et al. Optimization of thermoelectric efficiency in graded materials[C]. 22th International Conference on Thermo-electrics, New Jersey, United States; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003;421-424.

原书缺页347-350