

功率 LED 热设计时，考虑其真实的热阻

Dr. András Poppe, Marketing Manager, MicReD Division, Mentor Graphics Corp.

众所周知，LED 的发光特性与其工作条件有很大关系。应用在 LED 上的前向电流是主要的影响因素，电流越高，LED 产生的光通量也越多。令人感到遗憾的是，LED 是由一个恒定的电流源进行驱动的，当 LED 的温度上升时，它的光输出也会急剧下降。图 1 所示的是常见的 LED 基本参数对于输出光谱的影响。此外，本图也说明了 LED 的效率和发光颜色也会在峰值波长处发生偏移。

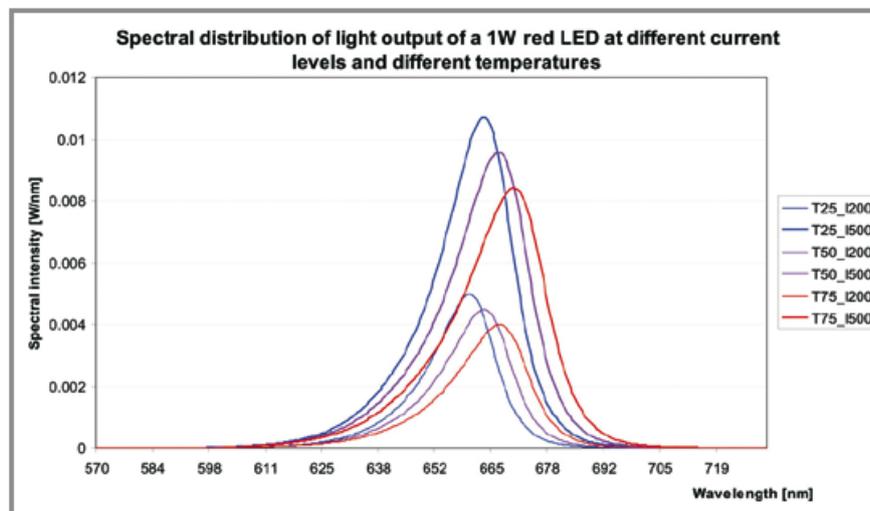


图 1 电流和温度对红色 LED 输出光谱的影响

LED 热特性的重要性

由于 LED 的光输出会随着温度发生变化，所以良好的热管理是功率 LED 照明应用的一个重要问题。通过降低 LED 的温度，我们可以使其保持较高的效率。在实际的应用环境中，LED 温度越低，其输出的流明也越多。

这就意味着在 LED 在实际应用中，其结点至环境的真实热阻是 LED 照明设计的一个重要因素。令人感到遗憾的是，不同 LED 供应商提供的产品热阻和其它与温度相关的特性参数五花八门。因此，不同的热标准机构也已经开始进行 LED 热管理的相关标准制定工作。现今，JEDEC JC15 协会正在起草一部关于 LED 热阻测量的新标准。此外，国际照明协会（International Lighting Committee）成立了两个新的技术协会（TC-2-63 和 TC-2-64），以处理 LED 热方面的问题。在这些协会之间逐渐达成了一个共识，那就是供应商在采用公式 1 计算 LED 热阻时，必须考虑实际的光功率 P_{opt} （换言之，辐射光通量）：

$$R_{th_real} = \Delta T_j / (I_F \times V_F - P_{opt}) \quad (1)$$

公式中 LED 前向电流和前向电压 ($I_F \times V_F$) 的乘积是 LED 工作所需要的电功率， ΔT_j 是 LED 的结温变化量。

当确定 LED 热阻的时候忽略光功率会得到比 LED 实际应用更低的热阻。如果 LED 照明设计师使用这些数据去计算 LED 灯的光输出量，其结果是他们的设计往往无法满足实际的光输出量的要求。实际情况中的热阻会更高，相应地 LED 结温也会更高。由此，实际 LED 照明设备发出的光通量会比预期要低。获取 LED 实际的热特性数据是成功设计 LED 的关键。

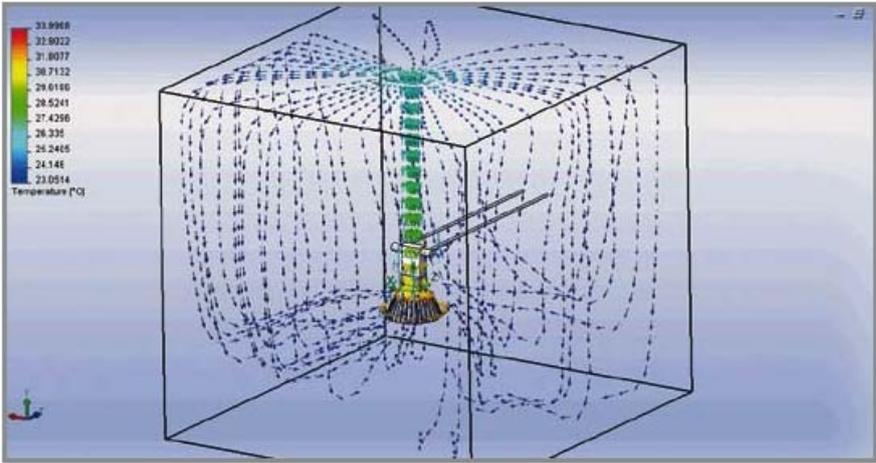


图 2 使用 FloEFD 对改进的 MR16 进行 CFD 分析

热特性：仿真和物理测试

热仿真可以帮助设计师了解他们 LED 产品的散热状况。因为 LED 光源发出的热量一般都通过自然对流的方式进入到周围环境中，CFD 分析工具是用以确定不同设计方案散热性能所必须的。

图 2 显示了在 JEDEC 标准自然对流测试环境中的一个改进 MR16 LED 灯的热仿真结果。



图 3 使用 Tr3ster 对改进的 MR16 进行测试

为了建立精确的热仿真模型，所以必须确定实际应用中的 LED 热阻值。实际应用中的 LED 热阻值通常可以由 Tr3ster 等测量仪器完成。Tr3ster 是 Mentor Graphics MicReD

团队开发的产品。图 3 是图 2 中 LED 热测试所使用的测试设备。

图 4 是由 Tr3ster 热瞬态测试仪测量得到的 LED 结温和 Z_{th} 的关系曲线。这个测试结果可以被用于获得 LED 导热路径上的详细结构信息，这里所指的导热路径主要是指 LED 的 PN 结至环境之间的热量传递路径。这些详细的结构信息以热阻和热容的关系曲线形式描述。这类曲线也被称之为结构函数。结构函数可以帮助设计师确定整个 LED 散热设计的每一部分的热阻，其中包括了 LED 结点，TIM，散热器或者照明设备。

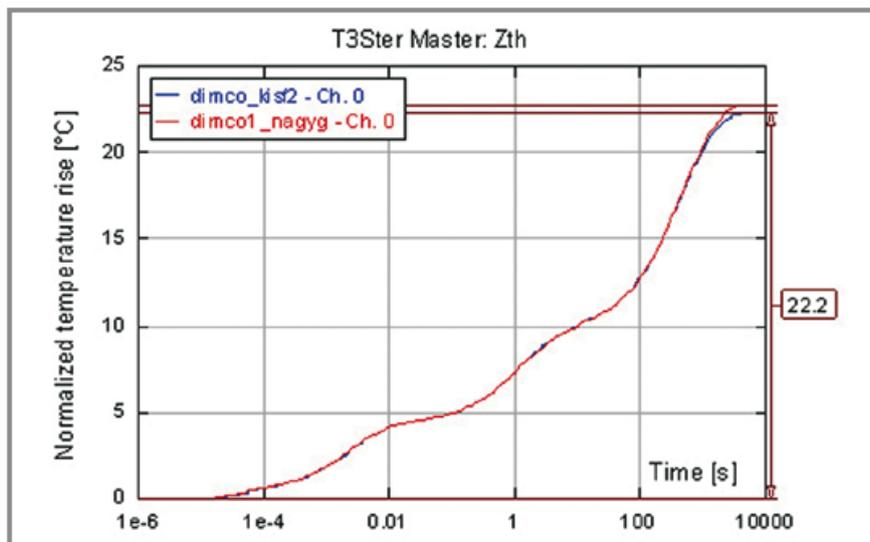


图 4 自然对流环境条件下使用两种不同插槽改进的 MR16 热阻抗曲线

图 5 显示了整个 LED 照明设备中结点至环境总热阻的 50%是由于 LED 自身所引起的。结构函数不仅仅能帮助结构分析（例如，die attach 失效探测），而且可以帮助生成封装元件动态的简化热模型。这类简化模型可以直接被 CFD 软件所使用。（一些半导体供应商也已经开始提供它们产品热性能的瞬态模型）

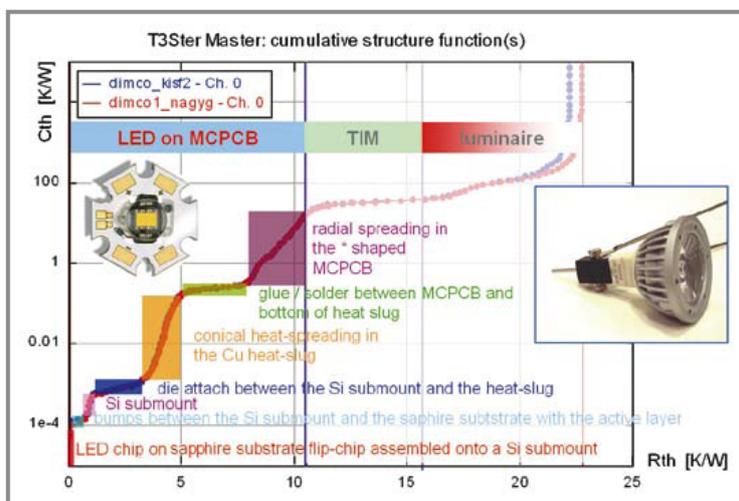


图 5 改进的 MR16 中各部分在总热阻的影响和结构函数

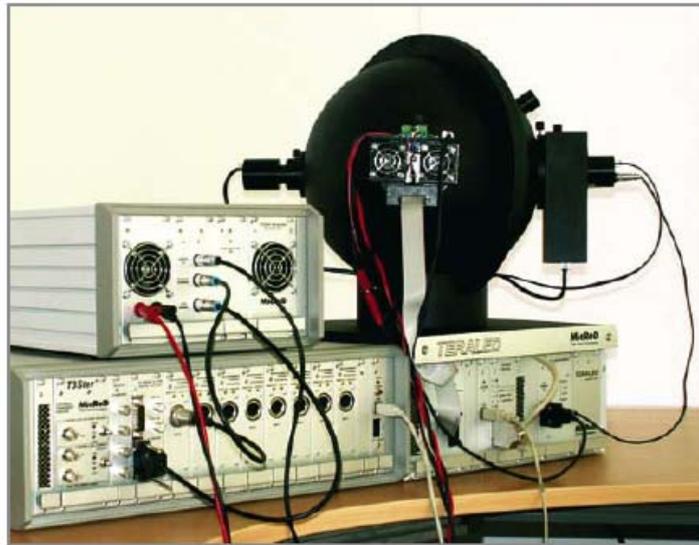


图 6 功率 LED 热和光同时测量

热和光度联合测量

图 4 和图 5 提供了一些对于解释非常有用的对比结果，而且对于实际的设计工作而言，热特性数据是必须的。所以，当计算实际的热阻值时，必须清楚地了解 LED 的光功率。

为了获得这方面的信息，一个热测试设备（符合应用热测试标准^[3]）必须具备测试 LED 光功率的功能。LED 光功率测试必须遵从 CIE 协会的相关标准^[4]。图 6 是这样一个测试系统的描述。Tr3ster 热测试仪器对处于 TERALED 系统中的被测试 LED 提供一个电功率，TERALED 是一个由累计球和探测器组成的自动光度测量装置。另外，整个系统中还包括电控制和测试数据处理软件。LED 助推器（图 6 左边的小盒子）让系统测试多芯片高前向电压（ $V_F > 10V$ ）的 LED。

通过 Tr3ster 对 LED 进行测量，我们可以在获得 LED 热阻的同时，也获得辐射通量，光通量，光输出特性，染色性等数据。我们可以在不同的参考温度和前向电流条件下，测量这些 LED 特性值。

在光度测量过程中加入热瞬态测试不会明显增加测试时间。如今功率 LED 在被贴附到冷板之后，通常可以在 30~60S 之内达到稳定的温度。所以，光度测量过程中包含热瞬态测试不会增加许多测试时间。

参考温度的影响

比较棘手的是，LED 总的热阻值与环境温度有很大的关系。这就意味着当预测 LED 散热性能时，必须注明测试环境（参考温度）。如果光度测量和热阻测量同时进行，则参

考温度就是冷板的温度。

LED 说明书中的数据是基于环境温度 25°C ，但往往 LED 的实际工作环境温度为 50°C ，最高甚至可以达到 80°C 。其结温的范围可能在 $80^{\circ}\text{C}\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的范围。较高的 LED 工作温度会导致 LED 光通量的大幅下降。

图 7 显示了 Cree MCE 系列白色 LED 光通量和参考温度的关系，这些测试主要基于两种不同的散热设计方案。测试主要由两块不同的 PCB，一个金属芯片和 FR4 装置所组成。此外，PCB 和散热器之间使用了不同的导热界面材料。当散热器温度不断增加，光通量不断下降。

因为两次测试使用一样的 LED，所以预计的测试结果是两条平行的曲线，但实际情况并非如此。总的结点至环境的热阻也随着参考温度的变化而变化。图 8 的结构函数也表明热流路径随温度变化。其中最初的 1.5K/W 的热阻是有 LED 内部封装所引起的。之后的热阻部分对应于 PCB 和位于 PCB 与 LED 封装之间的 TIM 材料。最后一部分是 PCB 与散热器之间的导热界面材料。在 TG2500 样品的测试中，两层 TIM 材料都显示出其热阻与温度有很大关系，从而导致了总热阻有 20% 的变化。图 8 中的结构函数被对应到 LED 的各个组成部分。

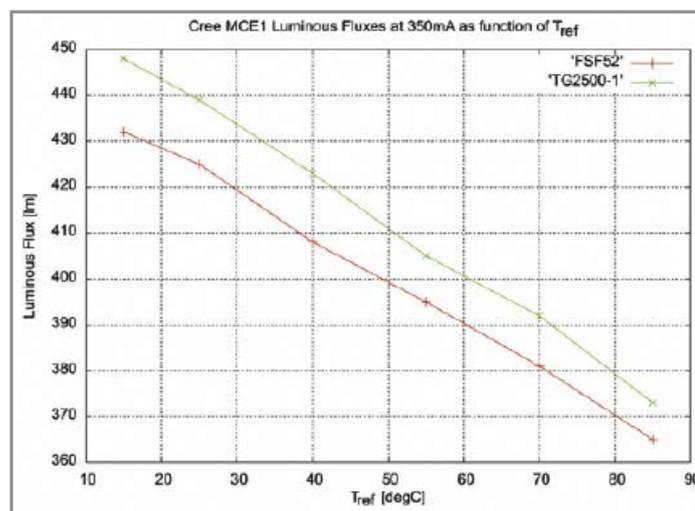


图 7 使用两种不同的散热设计，6W 白色 LED 参考温度和光通量的关系

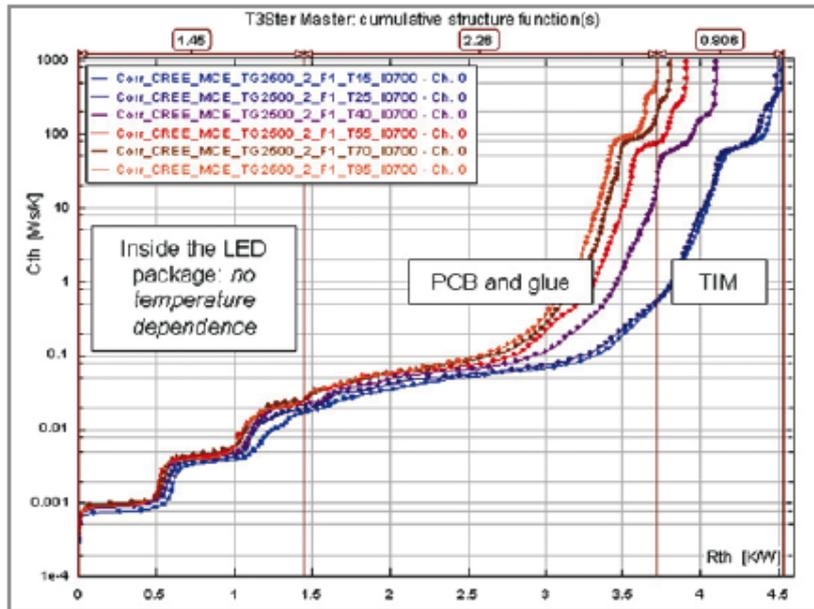


图 8 在 15°C 到 85°C 范围内 6W LED 的结构函数

光通量是真实结温的函数

一旦获得了 LED 每一个参考温度下的热损耗和参考温度值，通过公式 2 可以计算出实际 LED 结温：

$$T_j = T_{ref} + R_{thJA}(T_{ref}) \times P_{heat}(T_{ref}) \quad (2)$$

其中， $P_{heat} = I_F \times V_F(T_{ref}) - P_{opt}(T_{ref})$ 也是公式 1 中使用的， R_{thJA} 是测量的热阻值。如果将图 7 中的测试数据进行重新处理，将光通量作为 LED 结温的函数，我们发现两种测试的结果几乎一致（如图 9 所示）。两条几乎重合的光通量和结温的曲线表明，在我们两种测试中 LED 芯片和其封装有着一样的光输出特性。

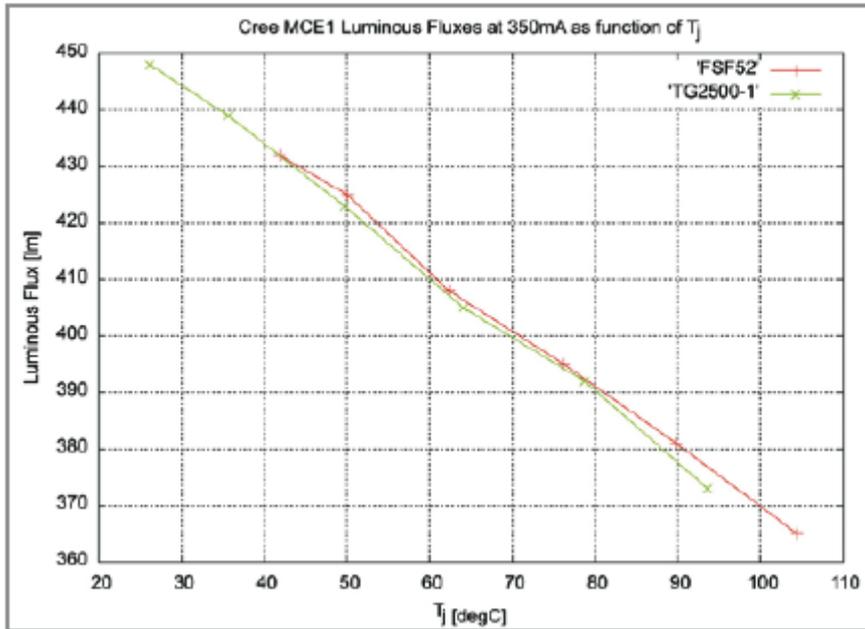


图 9 使用两种不同的散热设计，6W 白色 LED 结点温度和光通量的关系

结论

温度是 LED 照明设备性能的一个重要影响因素，不仅仅影响其预期工作寿命而且决定其工作性能。更低的工作温度可以获得更多的光通量。由于绝大多数的 LED 供应商没有将 LED 热阻测试和光度测试同时进行。所以，如今的 LED 说明书中无法提供 LED 真实的热阻值。因此，LED 供应商提供的热阻值要比 LED 实际应用中的热阻值要低。如果想要通过 CFD 仿真的方式获得 LED 的热性能，那么知道 LED 的真实热阻值是必须的。如果没有这方面的信息，那么结合光度测量和热瞬态测试，并且再进行一些测试数据处理就可以获得热阻的相关信息。

很少有 LED 说明书会注明各种温度下光输出特性。通过确定测试中 LED 的热阻和热损耗，可以将光输出特性描述成真实结温的函数。这就可以消除测试过程中不同环境温度对于实际热阻的影响。当光输出特性可以与实际的结温相对应，那么精确地比较不同的 LED 照明设备也就成为可能。

致谢

本文中的一些测试结果得到 Hungarian National Research and Technology Office KOZLED TECH_08-A4/2-2008-0168 项目的支持，并且得到 Budapest University of Technology and Economics, Department of Electron Devices 的处理。

参考

[1] Clemens J M Lasance and András Poppe, "LED Thermal Standardization: A Hot Topic", Electronics Cooling Magazine 15:(2) pp. 24-28. (2009)

http://electronics-cooling.com/html/2009_may_a3.php

[2] András Poppe and Clemens J M Lasance: „On the Standardization of Thermal Characterization of LEDs“, In: Proceedings of the 25th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'09) . San Jose, USA, 15/Mar/2009-19/Mar/2009, pp. 151-158. Reprinted also in the June 2009 issue of LED Professional Review.

[3] JEDEC JESD51-1 standard: www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf

[4] CIE Technical Report 127:2007 „Measurement of LEDs“, ISBN 978 3 9 01 906 58