文章编号：1000-7032(2018)05-0751-06

多芯片 LED 器件热学特性分析

陈焕庭*，陈福昌，何　洋，林　硕，熊传兵，周锦荣，陈赐海
（闽南师范大学 物理与信息工程学院，福建 漳州　363000）

摘要： 由于芯片之间存在的热耦合效应，多芯片 LED 器件内部存在复杂热学规律。本文通过多芯片 LED 热学模型描述多芯片 LED 器件系统内部热阻支路路径，进而通过有限体积数值计算多芯片 LED 器件结温。通过本文试验验证，单颗芯片、2 颗芯片、3 颗芯片以及 4 颗芯片在负载不同电功率(0.3 ~ 1.2 W)情况下，结温的测试值和计算值的最小误差值为 0.8%，最大误差值为 6.8%，平均误差值为 3.4%，计算结果与测试结果基本保持一致，因此有利论证了多芯片 LED 热学模型可为评价多芯片 LED 器件热学性能提供重要的参考作用，有助于更全面分析多芯片 LED 热阻内部芯片之间的热耦合效应。该实验结果为准确预测多芯片 LED 器件内部结温提供了重要理论依据。

关　键　词： 多芯片 LED 器件；热学特性；热耦合效应；结温；有限体积法
中图分类号： TN312^{+}.8　　**文献标识码：** A　　**DOI：** 10.3788/fgxb20183905.0751

Analysis of Thermal Characteristics of A Multichip Light-emitting Diodes Device

CHEN Huan-ting*, CHEN Fu-chang, HE Yang, LIN Shuo,
XIONG Chuan-bing, ZHOU Jin-rong, CHEN Ci-hai
(*College of Physics and Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou* 363000, *China*)
* *Corresponding Author, E-mail: htchen*23@163.*com*

Abstract: A multichip LED device has complex interaction and mechanism due to thermal coupling effect. An estimation method for the thermal network model of the multichip LED device based on multichip thermal model was proposed in this paper. The predicted junction temperature in finite volume method was applied to the multichip LED device. The minimum, maximum and average deviations of junction temperature between the proposed model and the measurement are about 0.8%, 6.8% and 3.4%, respectively. The calculated results are in good agreement with the measurements. These results confirm that the multichip thermal model with finite volume method can provide accurate predictions for junction temperature. The work offers a new research and development tool for practicing LED designers to accurately predict the junction temperature of LED system.

Key words: multichip light-emitting diodes device; thermal characteristics; thermal coupling effect; junction temperature; finite volume method

收稿日期： 2017-09-06；**修订日期：** 2017-11-25
基金项目： 福建省杰出青年自然科学基金(2016J06016)；国家自然科学基金(61307059,61405086)；福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划；漳州市自然科学基金(ZZ2017J04)；福建省自然科学基金(2016J01758,2017J01772)；福建省教育厅科技项目(JAT160284,JK2017033,JAT160303)；国家级大学生创新创业训练计划项目(201710402016)资助
Supported by Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Fujian Province(2016J06016); National Natural Science Foundation of China(61307059,61405086); Program for New Century Excellent Talents in University of Fujian Province; National Science Foundation of Zhangzhou(ZZ2017J04); Natural Science Foundation of Fujian Province (2016J01758, 2017J01772); Science Project of Education Bureau of Fujian Province(JAT160284,JK2017033,JAT160303); National Undergraduated Innovative Trainng Program(201710402016)

1 引 言

多芯片 LED 器件是将多个 LED 芯片集成在散热基板上,并实现整体封装的一种技术。与单芯片 LED 器件封装相比,多芯片 LED 器件可提高单位体积内光源的集成度,有利于 LED 光源体积降低[1-2]。随着多芯片 LED 器件集成度的提高和体积的缩小,尤其是对于集成大功率芯片的 LED 器件,其内部具有多个热源,热源之间的热耦合效应明显,单位体积内的功耗较大,随着 LED 器件结温升高,将影响到 LED 光源的光学特性以及电学特性,可靠性降低[3-4]。因此,分析多芯片 LED 器件内部热学模型,准确计算其结温已经成为目前多芯片 LED 器件应用中不可忽略的一个重要环节[5-7]。

传统热设计方法需要通过对样品进行大量的实验分析比对,最终提出合理的散热结构方案,因此存在很大的局限性。目前普遍采用计算机仿真软件对 LED 的不同散热结构进行热模拟分析,通过对多种优化结构的计算分析,确定最合理的改进方案,并最终将热仿真结果与实际测试进行对比论证,从而验证设计方案的可行性。

多热阻模型的优点是热分析行业内普遍认可的,它可以简化封装模型,在热模拟过程中节省网格,大大降低仿真时间,精度高于单热阻以及双热阻模型,目前国外电子厂商和软件公司对多热阻模型的研究投入力度很大,国内尚处于起步阶段,基于欧洲基金项目而建立的 DELPHI 热阻网络模型,已被广泛应用于电子设备热设计中[8],该模型是目前世界最流行的热阻提取方法。

本文通过建立多芯片 LED 热学模型,阐明器件内部热阻支路的变化情况,对研究器件内部各层材料的温度响应特性具有参考价值,另一方面该模型有助于更全面分析多芯片 LED 热阻内部芯片之间的热耦合效应。基于有限体积数值方法计算分析多芯片 LED 器件在不同负载电功率情况下的结温,与测试值进行比较,进而验证所提出的热学模型和计算方法的有效性。

2 有限体积法理论

有限体积法可认为是有限差分法的积分形式,有限差分法对微分方程进行离散,而有限体积法直接对积分方程进行离散[9]。

如果求解域中有 n 个网格,则需要建立 n 组方程求解其对应的温度 T,各个方向速度 μ、ν、w,如有 5 000 个网格,则需要求解 25 000 个方程,采用涡流分析模型,则需要求解更多的方程。网格分布将直接影响到求解精度,一般而言,可先粗化网格再对关键区域进行网格细化,网格数量越多,求解精度越高,计算时间越长。在计算过程中选取每个单元网格作为一个有限监控体。在每个监控体内,针对目标变量,建立质量、动量、热能的积分控制方程

$$\oint \rho\varphi V \mathrm{d}S = \oint \Gamma_\varphi \nabla\varphi \mathrm{d}S + \int_\Omega S_\varphi \mathrm{d}\Omega, \tag{1}$$

式中 ρ 为监控体密度,V 为速度,S 为监控体表面区域,Γ_φ 为 φ 的扩散系数,S_φ 为监控体内部的 φ 源,Ω 为监控体体积。

将积分控制方程在空间上进行离散化

$$\sum_f^{N_f} \rho\varphi_f V_f S_f = \sum_f^{N_f} \Gamma_\varphi (\nabla\varphi)_n S_f + S_\varphi \Omega, \tag{2}$$

式中 N_f 为监控体表面个数,f 为在表面位置变量值。

若需要进行瞬态分析,须对包含时间变量的方程进行离散化。一般而言,控制方程具有非线性和耦合性,因此通过迭代获得求解结果。

求解过程中,先将网格粗化,进行粗略计算,再将计算结果回代入原网格中,作为原网格的初始值,从而加速求解速度,减少迭代次数,减少计算时间。重点对关键求解区域网格加密细化,进行数值回插,获得目标变量的求解结果。

3 多芯片 LED 热学模型

多芯片 LED 热学模型如图 1 所示,其中 R_1 为多芯片 LED 器件中各个芯片结到内部热沉的热阻,R_2 与 R_3 为多芯片 LED 器件中相邻芯片之间的耦合热阻,R_2 与 R_3 大小与芯片之间的相对距离相关。该多芯片器件中单颗 LED 芯片的热功率表示为

$$P_\mathrm{h} = \sum_{i=1}^{n} (T_\mathrm{j} - T_i)/R_i, \tag{3}$$

式中 T_j 为结温,P_h 为 LED 芯片热功率,R_i 为第 i_th 结点的热阻,当热阻支路与沿着 X 轴或 Y 轴方向相邻结点连接时,则 T_i 为相邻结点温度。当热阻支路与沿着 Z 轴方向相邻结点连接时,则 T_i 为该结点内部铜层温度。

热阻支路与沿着 Z 轴方向上多芯片 LED 器件结点到内部铜层之间的总热阻 R_{JS} 可以用并联阻抗的公式表示

$$\frac{1}{R_{JS}} = \frac{1}{R_{JS1}} + \frac{1}{R_{JS2}} + \cdots + \frac{1}{R_{JSN}}, \tag{4}$$

假设每个 LED 芯片结点到内部铜层之间形成的热阻相等，则有：

$$R_{JS} = \frac{R_{JS1}}{N}, \tag{5}$$

LED 结点到环境之间形成的总热阻可表示为：

$$R_{JA} = R_{JS} + R_{SA} = \frac{R_{JS1}}{N} + R_{SA}, \tag{6}$$

由上式而知，单芯片结至内部热沉热阻 R_{JS} 为 N 芯片的 N 倍，而内部铜层至环境热阻 R_{SA} 与 N 芯片相同。

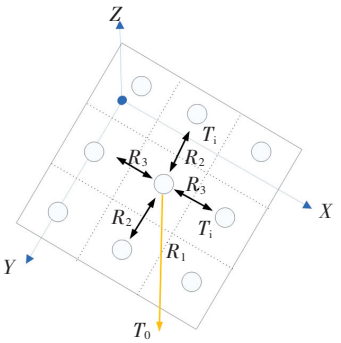

图 1　多芯片 LED 的热学模型

Fig. 1　Thermal model of a multichip LED device

4　实　　验

采用 T3Ster&Teraled 光电热测试系统测试多芯片 LED 器件的光学及热学特性。T3Ster 是用于测试 IC、LED、散热器、热管等电子器件热特性的热测试仪。运用 JEDEC 静态试验方法(JESD51-1)，通过改变电子器件的输入功率，使得器件产生温度变化，在变化过程中，T3Ster 测试出芯片的瞬态温度响应曲线，基于升温或降温曲线可分析得到待测器件全面的热特性，利用 R-C 热阻网络和结构函数理论，定量提取出待测器件内部的热流路径，从而获得积分结构函数和微分结构函数[10-12]。本文研究的多芯片 LED 器件为 CREE-MCE(型号：MCE4WT-A2-0000-000K01)，为同一个基板上集成 4 颗芯片白光 LED，这 4 颗芯片单独引出电极焊盘，即可独立控制每颗 LED 芯片的驱动电流。该封装配光结构为朗伯光型分布，发光角度为 110°。多芯片 LED 器件加载测试电流 1 mA，热沉温度控制范围 25 ~ 55 ℃，每间隔 10 ℃采集待测器件的正向电压，依据电压随温度变化关系，计算电压-温度系数 K。将待测样品加载电流 350 mA，利用 Teraled 系统测试器件输出的光功率，并将待测器件电功率扣除所测试的光功率，获得其热功率。

本文对 LED 芯片结构简化处理，芯片由 P 型、N 型 GaN、多量子阱 InGaN、电流扩展层和电极组成。作为优化电流密度分布的电极，因为对器件热场分布影响很小，因此可将其忽略。由于量子阱和电流扩展层厚度在纳米数量级别，因此可将芯片近似为 GaN 材料。该多芯片 LED 器件封装尺寸为 7 mm × 7.5 mm，芯片尺寸为 1 mm × 1 mm，器件内部铜层厚度 1.45 mm，多芯片 LED 器件固定于 MCPCB，该 MCPCB 的尺寸为 20 mm × 20 mm × 2 mm。芯片热导率为 30 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$，芯片粘结层热导率 15 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$，器件内部铜层热导率为 180 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$，多芯片 LED 器件与 MCPCB 之间导热硅的胶热导率为 2.5 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$，MCPCB 热导率为 170 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$。本文采用有限元体积仿真软件 FLOTHERM 对该样品进行热学仿真。其中边界条件设置为 25 ℃，同时对 MCPCB 的温度进行固定设置，即所采用的流动模型为强制对流模型，所设置求解域范围在 1 m × 1 m 范围。求解域的边界条件设置为空气导热系数、粘滞度、密度分别为 2.61×10^{-2} $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$，$1.84 \times 10^{-5}$ $N \cdot s \cdot m^{-2}$，1.16 $kg \cdot m^{-3}$。

图 2　多芯片 LED 封装结构

Fig. 2　Package structure of a multichip LED device

5　结果与分析

图 3 为多芯片 LED 器件在单颗芯片、2 颗芯

片、3 颗芯片以及 4 颗芯片工作情况下的正向电压随温度的变化趋势。电压随着芯片增多而降低,可能原因为:基于肖特基二极管模型[6],正向电压与器件本身串联电阻 R_s 成正比。随着芯片数目增多,即并联支路增多,进而使总的并联多路 R_s 的总值减小,进而引起正向电压降低。依据正向电压随温度变化关系,计算电压-温度系数 K,单颗芯片、2 颗芯片、3 颗芯片以及 4 颗芯片的电压-温度系数分别为 −2.38, −2.43, −2.41, −2.47 mV·℃$^{-1}$。

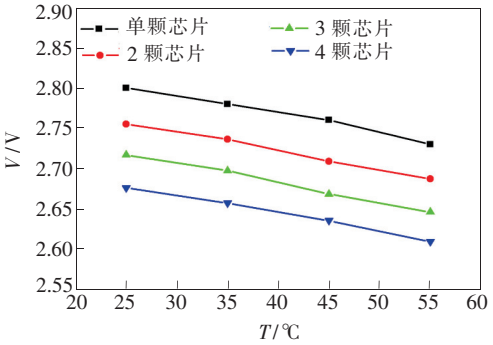

图 3 多芯片 LED 器件电压-温度曲线

Fig. 3 Voltage-temperature curve of the multichip LED device

多芯片 LED 器件结构为 4 颗芯片并联而成。将样品固定在控温热沉之上,热沉温度为 25 ℃,控制并联支路总电流分别为 350, 700, 1 050, 1 400 mA,即 350 mA 工作电流分别同时加载于 1 颗、2 颗、3 颗、4 颗芯片。图 4 为多芯片 LED 器件的温度响应曲线图,随着加载电功率的增加,器件结温明显提高,单颗芯片、2 颗芯片、3 颗芯片以及 4 颗芯片的结温升高幅度分别为 9.7, 11.5, 13.7, 17.2 ℃。图 5 为多芯片 LED 器件温度场仿真结果。

将样品固定在控温热沉之上,测试其积分结构函数曲线,如图 6 所示。4 颗芯片同时工作时,

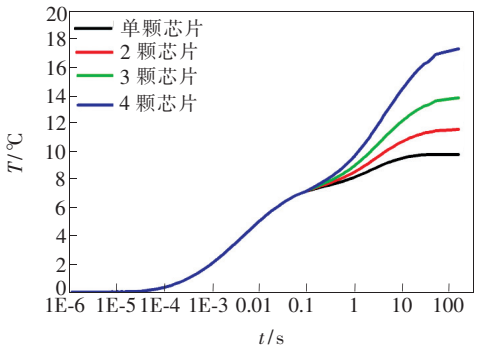

图 4 多芯片 LED 器件温度响应曲线

Fig. 4 Temperature response curve of the multichip LED device

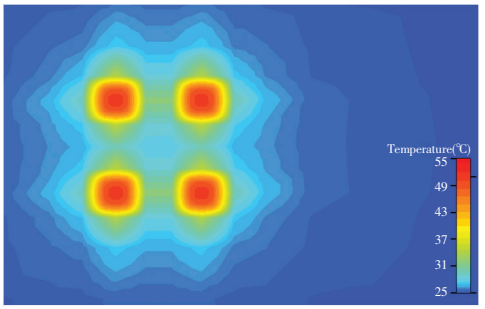

图 5 多芯片 LED 器件温度场仿真结果

Fig. 5 Simulated temperature distribution of the multichip LED device

器件结至内部铜层热阻 R_{JS4} 为 2.1 ℃·W^{-1},内部铜层至环境热阻 R_{SA} 为 2.3 ℃·W^{-1};两颗芯片同时工作下器件结至内部铜层热阻 R_{JS2} 为 4.4 ℃·W^{-1},大约为 4 颗芯片同时工作状态下 R_{JS} 的 2 倍,内部铜层至环境热阻 R_{SA} 为 2.0 ℃/W,大约等同于 4 颗芯片同时工作状态下 R_{SA};单芯片工作时器件 R_{JS1} 为 8.7 ℃·W^{-1},大约为 4 颗芯片同时工作状态下 R_{JS4} 的 4 倍;单芯片工作时器件 R_{SA} 为 2.2 ℃·W^{-1},大约等同于 4 颗芯片同时工作状态下 R_{SA}。

4 颗芯片之间的耦合热阻由 R_{JC}^{12}、R_{JC}^{13}、R_{JC}^{14}、R_{JC}^{23}、R_{JC}^{24}、R_{JC}^{34} 分别表示,芯片 1-st, 2-nd, 3-rd, 4-th 依次加载电流,4 芯片的温升分别通过实验测试以及模拟获得。比如计算耦合热阻 R_{JC}^{12}:芯片 1、3 和 4 都没有负载电流,芯片 2 负载热功率 P_{h2}(电功率扣除光功率),由于耦合热阻 R_{JC}^{12} 的存在,使芯片 1 的结温升高 T_{12},则耦合热阻 $R_{JC}^{12} = T_{12}/P_{h2}$。

计算耦合热阻 R_{JC}^{12}、R_{JC}^{13}、R_{JC}^{14}、R_{JC}^{23}、R_{JC}^{24}、R_{JC}^{34} 分别为 32.1, 36.5, 32.8, 33.1, 37.1, 33.4 ℃·W^{-1}。芯片 1-st 到芯片 2-nd 和 4-th 的间距相同,因此

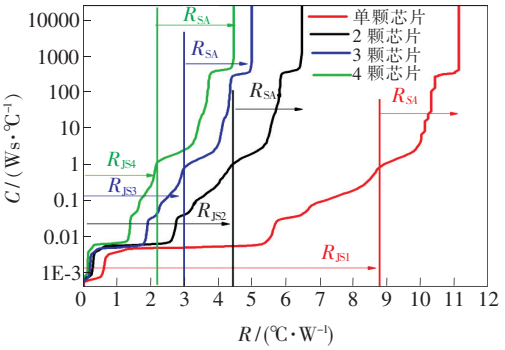

图 6 多芯片 LED 器件积分结构函数

Fig. 6 Cumulative structure function of the multichip LED device

R_{JC}^{12}基本等于 R_{JC}^{14}，而芯片 3-rd 到芯片 1-st 以及芯片 2-nd 到芯片 4-th 的距离相对较远，R_{JC}^{13}和 R_{JC}^{24}耦合热阻较大。

将样品固定在散热器上，散热器热阻为 12 ℃·W^{-1}，用 0.3～1.2 W 电功率分别同时加载 1 颗、2 颗、3 颗、4 颗芯片，测试其结温。同时利用有限体积法及多芯片热阻模型，计算结温，计算值和测试值如图 7 所示。单颗芯片同时加载 0.3 W 电功率时，器件结温测试值为 27.2 ℃，计算值为 28.1 ℃，两者误差值为 3.3%；当负载电功率为 1.2 W 时，结温测试值为 43.1 ℃，计算值为 45.2 ℃，两者误差值为 4.8%。4 颗芯片同时加载 0.3 W 电功率时，器件结温测试值为 35.8 ℃，计算值为 36.6 ℃，两者误差值为 2.2%；当负载电功率为 1.2 W 时，结温测试值为 76.5 ℃，计算值为 79.6 ℃，两者误差值为 4.1%。1 颗芯片、2 颗芯片、3 颗芯片以及 4 颗芯片在负载不同电功率情况下，结温的测试值和计算值的最小误差值为 0.8%，最大误差值为 6.8%，平均误差值为 3.4%。因此可证实所采用的多芯片 LED 热学模型以及有限体积数值计算方法的有效性。

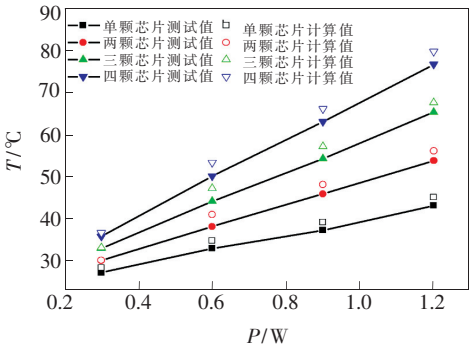

图 7　多芯片 LED 器件结温与电功率曲线

Fig. 7　Junction temperature *versus* electrical power of the multichip LED device

6　结　　论

本文结合有限体积方法及多芯片 LED 热学模型分析多芯片 LED 热学特性。通过建立多芯片 LED 热学模型可阐明器件内部热阻支路的变化情况，对研究器件内部各层材料温度响应特性具有参考价值，另一方面该模型有助于更全面分析多芯片 LED 热阻内部芯片之间的热耦合效应。

对于多芯片 LED 器件结温，单颗芯片、2 颗芯片、3 颗芯片以及 4 颗芯片在负载不同电功率(0.3～1.2 W)情况下，结温的测试值和计算值的最小误差值为 0.8%，最大误差值为 6.8%，平均误差值为 3.4%，计算结果与测试结果基本保持一致，因此有利论证了多芯片 LED 热学模型可为评价多芯片 LED 器件热学性能提供重要参考。

参　考　文　献：

[1] 徐玉珍，林维明. 一种简化变量的新型 LED 光电热模型[J]. 光学学报，2013，33(5):0523001-1-7.
XU Y Z, LIN W M. A novel LED photo-electro-thermal model with simplified variables [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2013, 33(5):0523001-1-7. (in Chinese)

[2] 徐广强，于慧媛，张竞辉，等. 基于单色 LED 补偿白光 LED 技术的模拟太阳光谱研究[J]. 发光学报，2017，38(8):1117-1124.
XU G Q, YU H Y, ZHANG J H, *et al.*. Solar spectrum matching based on white LED compensated with monochromatic LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(8):1117-1124. (in Chinese)

[3] CHEN H T, TAN S C, HUI S Y. Color variation reduction of GaN-based white light-emitting diodes *via* peak-wavelength stabilization [J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2014, 29(7):3709-3719.

[4] CHEN H T, HUI S Y. Dynamic prediction of correlated color temperature and color rendering index of phosphor-coated white light-emitting diodes [J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2014, 61(2):784-797.

[5] 李天保，赵广洲，卢太平，等. 非故意掺杂 GaN 层厚度对蓝光 LED 波长均匀性的影响[J]. 发光学报，2017，38(9):1198-1204.
LI T B, ZHAO G Z, LU T P, *et al.*. Effect of undoped GaN layer thickness on the wavelength uniformity of GaN based blue LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(9):1198-1204. (in Chinese)

[6] CHEN H T, TAN S C, HUI S Y. Analysis and modeling of high-power phosphor-coated white light-emitting diodes with a large surface area [J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2015, 30(6):3334-3344.

[7] 廖炫, 郭震宁, 潘诗发, 等. LED 汽车前大灯散热器正交优化设计与分析 [J]. 光子学报, 2016, 45(11):1122003.
LIAO X, GUO Z N, PAN S F, *et al.*. Orthogonal optimization design and analysis of the LED car headlights [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2016, 45(11):1122003. (in Chinese)

[8] ROSTEN H I, LASANCE C J M, PARRY J D. The world of thermal characterization according to delphi-part I: background to Delphi [J]. *IEEE Trans. Compon. Hybr. Manuf. Technol.*, 1997, 20(4):384-391.

[9] SABRY M N. Compact thermal models for electronic systems [J]. *IEEE Trans. Compon. Packaging Technol.*, 2003, 26(1):179-185.

[10] INCROPERA E P, DEWITT D P, BERGMAN T L, *et al.*. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* [M]. 6th ed. New York: Baker & Taylor, 2006.

[11] SZÉKELY V. A new evaluation method of thermal transient measurement results [J]. *Microelectron. J.*, 1997, 28(3): 277-292.

[12] 邓辉, 吕毅军, 高玉琳, 等. 交流发光二极管热特性的模拟分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(6):0623001-1-6.
DENG H, LÜ Y J, GAO Y L, *et al.*. Thermal simulation of alternating current light emitting diodes [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2012, 32(6):0623001-1-6. (in Chinese)

陈焕庭(1982 -),男,福建漳州人,博士,副教授,2010 年于厦门大学获得博士学位,主要从事半导体照明技术的研究。
E-mail: htchen23@163.com