

一种简化变量的新型 LED 光电热模型

徐玉珍 林维明

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要 综合分析了新一代电光源 LED 的光-电-热理论和现有的相关模型, 针对 Hui 等提出的模型, 采用数学推导、仿真和实验相结合的方法, 分析了 LED 封装模组在散热片温度恒定时, 其正向电流和输入功率之间存在的一定线性关系。从电路驱动控制角度, 进一步推导出一种简化变量的新型 LED 光电热模型。该模型的变量采用易于检测的 LED 散热片温度和易于控制的 LED 正向电流。通过两种典型 LED 封装模组的光学实验验证了所提模型的可行性。与 Hui 等的 LED 光电热模型相比, 该模型具有简单、方便电路驱动控制的特点, 可为 LED 照明系统的设计, 建立优良光学特性的 LED 驱动电源控制策略和驱动电路调光控制技术提供理论依据。

关键词 光电子学; 光效; 光-电-热理论; 正向电流; 散热片温度

中图分类号 TM23; TN383 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0523001

A Novel LED Photo-Electro-Thermal Model with Simplified Variables

Xu Yuzhen Lin Weiming

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract The existing photo-electro-thermal theory and models of LED are analyzed. Based on the model proposed by Hui *et al.*, combining mathematical derivations, simulations and experiments, a linear relationship between the positive input current and input power is studied when the LED package module is at a constant temperature of heatsink. From the circuit control strategy, a novel photo-electro-thermal LED model with simplified variables is proposed. The temperature of heatsink and input current are the two variables of this model, which are easy to measure and control. The feasibility of the proposed model is verified by optical experiments on two typical LED package modules. Compared with the model proposed by Hui *et al.*, the model is simple and convenient to perform circuit drive control. It is helpful for the design of the LED lighting system and the establishment of LED drive power control strategy with excellent optical properties, providing a theoretical basis for LED dimmer control technology.

Key words optoelectronics; luminous efficiency; photo-electro-thermal theory; forward current; temperature of heatsink

OCIS codes 230.1150; 230.2090; 230.3670; 230.5170

1 引 言

LED 作为新型高效固体电光源, 由于高效、环保和寿命长等优点, 广泛应用在室内外照明、道路照明、景观设计和指示灯等方面, 是最有潜力的新一代照明电光源^[1~4]。LED 是一个光、电、热彼此间相互影响的多学科混合系统, 其光通量和光效的大小与输入电流、温度是密不可分的^[5~15]。近年来, 许多专家学者致力于建立 LED 光、电、热三领域内相

互作用的关系, 并得到一些相关理论和模型^[2,9,10,15~19], 其中以 Hui 等^[9,10]所提出的 LED 的光-电-热理论较为系统完整。他们建立了以 LED 芯片的结温、环境温度、散热片热阻及输入功率为变量的 LED 光-电-热数学模型。该模型主要的不足是较为复杂, 所需模型变量较多且有的较难获得, 如 LED 的结温。此外, LED 驱动电源主要控制对象往往是正向电流, 所以该模型对于 LED 驱动电源控制

收稿日期: 2012-11-07; **收到修改稿日期**: 2013-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(60572016)和福建省自然科学基金(2011J01294)资助课题。

作者简介: 徐玉珍(1975—), 女, 博士研究生, 副教授, 主要从事 LED 照明和电力电子交流方向等方面的研究。

E-mail: xyzhen008@qq.com

导师简介: 林维明(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子交流方面的研究。E-mail: weiming@fzu.edu.cn

策略和电路实现有诸多不便。

针对 Hui 等所提 LED 光-电-热理论,本文提出了一种新型 LED 光电热模型,模型变量为两个,一个是 LED 封装模组与散热片连接处温度(以下称散热片温度, T_{hs}),另一个是 LED 正向电流。该模型用散热片温度表征热对 LED 光输出的影响作用;以正向电流体现电对 LED 光输出的影响。与原模型相比,本模型大大简化。通过 Cree 公司的 LED 封装模组 XPG R4 和 Philips Lumileds 公司的 LED 封装模组 LXML-PWC2 进行光学实验验证,研究表明所提出的 LED 的光电热模型与光学实验结果具有较好的一致性,可为高光效和高可靠性的 LED 驱动电源和控制策略提供理论依据。

2 模型研究

文献[9]所提出的模型是一个包含芯片结温、环境温度、散热片热阻以及输入电功率为变量的数学模型,该模型概念明确,但所需的参数、变量较多且有的较难测量。现有研究表明:LED 电光源的光学特性离不开温度和电功率两个物理量,而电功率与正向电流密切相关。因此,LED 光电热模型可以考虑用温

度和正向电流变量来更简便与直接地表达,而温度变量的选取不仅要能准确反应 LED 热现象,而且还应该以易于检测为依据。选取散热片温度为模型变量并进行下面的模型推导。

2.1 LED 输入功率和正向电流

2.1.1 理论分析

LED 具有类似普通二极管的特性,其正向伏安特性可表示为

$$i_d = I_s \left[\exp\left(\frac{qu}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

式中 i_d 为正向电流; u 为正向电压; I_s 为反向饱和电流; q 为电子电荷量,其值为 1.602×10^{-19} C; k 为波尔兹曼常数,其值为 1.38×10^{-23} J/K; T 为热力学温度,单位为 K; n 为常数,取值范围为 $1 \sim 2$ 。

根据(1)式,可反求出 LED 正向电压与正向电流的关系:

$$u = \frac{kn(T+273)}{q} [\ln(i_d + I_s) - \ln I_s]. \quad (2)$$

根据(2)式,进一步可得出功率与正向电流的表达式,由于 I_s 较小,功率的表达式可近似为

$$p_d = u i_d \approx \frac{kn(T+273)i_d}{q} [\ln(i_d) - \ln I_s], \quad (3-1)$$

$$p_d = \frac{kn(T+273)i_d}{q} \left[\sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} \frac{(i_d-1)^m}{m} - \ln I_s \right] \approx \frac{kn(T+273)}{q} \left[-\frac{i_d^3}{2} + 2i_d^2 - \left(\frac{3}{2} + \ln I_s\right) i_d \right]. \quad (3-2)$$

当 $0 \leq i_d \leq 2$ 时,则 $-1 \leq i_d - 1 \leq 1$, (3-1) 式中正向电流的取对数项可用泰勒级数进行展开, (3-2) 式为泰勒级数展开两项后的功率近似表达式。

(3-2) 式代入相应的物理参数后,电流 i_d 的三次方项、二次方项前的系数都比一次方项的系数小很多,当 LED 正向输入电流小于 1 A 时,输入功率式可近似表示为电流的一次方函数。根据 LED 的实际情况,通常要加上一个较小的常数进行修正,即输入功率与正向电流的表达式近似线性化为

$$p_d = \frac{-kn(T+273)}{q} \left(\frac{3}{2} + \ln I_s \right) i_d + b = a i_d + b, \quad (3-3)$$

式中 $a = \frac{-kn(T+273)}{q} \left(\frac{3}{2} + \ln I_s \right)$, 温度恒定时 a, b 均为常数。

2.1.2 仿真与实验

以 Cree-XPG R4 封装模组为例,芯片与散热片连

接处温度 T_{hs} 为 70 °C, 正向电流 $i_d \leq 1$ A 时,根据(3-1)、(3-2)、(3-3)式分别得到具体的功率表达式为

$$p_d = 3.082i_d + 0.03i_d \ln i_d, \quad (4-1)$$

$$p_d = -0.0148i_d^3 + 0.06i_d^2 + 3.038i_d, \quad (4-2)$$

$$p_d \approx 3.038i_d - 0.0845. \quad (4-3)$$

图 1(a)~(c) 为三种功率表达式计算的理论与实测功率曲线。从图中可看出三条理论曲线都与实测功率曲线非常接近。仿真计算出(4-1)、(4-2)、(4-3)式功率曲线与实测功率曲线的线性相关度分别为 0.988、0.996 和 0.986; 其中(4-1)式和(4-3)式表示的功率理论曲线之间的线性相关度为 0.953。功率线性表达式(4-3)式与实测功率曲线在电流较大的地方出现误差,经计算最大误差为 0.036,属于正常误差范围。此外根据实验数据通过仿真软件直接线性拟合所得直线方程的系数 $a =$

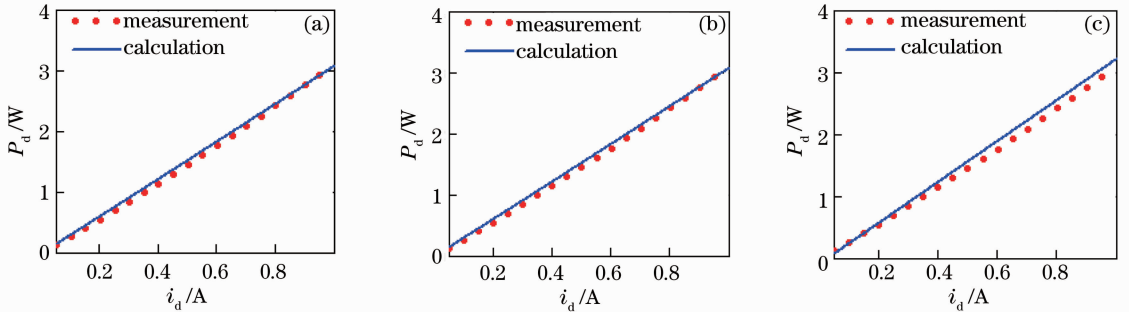


图1 理论计算功率与实测功率曲线。(a) (4-1)式；(b) (4-2)式；(c) (4-3)式

Fig.1 Power curves of theoretical calculation and measurement. (a) Formula (4-1); (b) formula (4-2); (c) formula (4-3)

3.1384、 $b = -0.0845$ ，与(4-3)式推导的直线方程系数非常接近，与实测功率曲线的线性相关度高达0.999。

由图1曲线分析可以说明，在一定条件下，可以近似地用正向电流线性函数表达LED功率变量。经过其他LED封装模组的仿真分析和实验测试，发现大功率LED封装模组在一定正向电流范围内，温度恒定时，电功率与正向电流之间近似呈线性关系。由于篇幅原因，这里不再细述。

由上述分析可知：功率与电流三种不同表达形式的仿真分析表明，在输入电流小于1A，温度恒定时，大功率LED的输入电功率与输入电流之间呈现近似线性关系。

若正向电流为直流(DC)时，电功率与正向电流之间的关系可表示为

$$P_d = aI_d + b, \quad (5)$$

式中 a 、 b 为常数。

2.2 LED封装模组的光电热模型

通入直流电时，单个LED的光通量 ϕ 与光效 E 的模型为

$$\phi = EP_d, \quad (6)$$

式中 P_d 为输入电功率。将(5)式代入(6)式，可进一步转换得到光通量 ϕ 与正向输入电流 I_d 的关系：

$$\phi = E(aI_d + b). \quad (7)$$

文献[9,16]研究表明，当正向电流 I_d 恒定时，光效 E 与结温 T_j 的关系近似线性递减，如图2所示，即随着结温的升高LED的光效将线性递减。正向电流 I_d 恒定时光效与结温的关系可表示为

$$E = E_0[1 + k_e(T_j - T_0)], \quad (8)$$

式中 k_e 为光效随温度的变化率， $k_e < 0$ ； T_j 为LED结温，文献[9]指出 T_0 为结温25℃， E_0 为结温25℃对应的额定光效，该值大小与正向额定电流 I_d 有关。研究表明只要是直线上的点，都可以作为

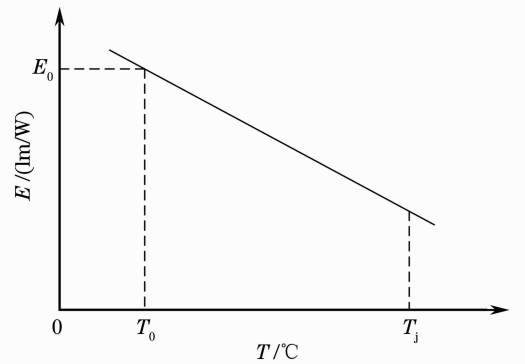


图2 LED芯片光效与结温典型关系曲线

Fig.2 $E-T_j$ relation curve of LED

T_0 、 E_0 。

由LED的发光原理可知，输入电功率 P_d 一部分使LED芯片发光，一部分使LED芯片发热。发热的这部分功率造成LED结温升高。定义LED发热功率为 P_{heat} ，与输入电功率 P_d 间的关系可表达为

$$P_{heat} = K_h P_d, \quad (9)$$

式中 K_h 为发热系数，即电热转换效率。定义LED发光系数为 η_{opt} ，可理解为LED的电光转换效率，它将决定LED发光功率的大小， η_{opt} 的表达式为

$$\eta_{opt} = 1 - K_h. \quad (10)$$

结温 T_j 与散热片温度 T_{hs} 之间存在的关系为

$$T_j = T_{hs} + R_j P_{heat}, \quad (11)$$

式中 R_j 为LED的内部热阻(芯片厂家提供)。

发热系数 K_h 和发光系数 η_{opt} 都不是常数，随正向电流和结温的改变，会产生相应的变化，其变化规律可以通过实验确定。文献[16]通过实验得到了发光系数 η_{opt} 以结温和输入功率为变量的函数模型，研究表明当结温固定时，发光系数随着输入功率的增加近似呈线性下降；当输入功率恒定时，发光系数随着结温的上升几乎也呈线性下降。基于(9)~

(11)式及以上分析可知,当固定正向电流 I_d 时,发热系数 K_h 将随散热片温度的上升而线性上升;当固定散热片温度 T_{hs} 时,发热系数 K_h 同样将随正向电流的上升也线性上升,因此 K_h 与正向电流 I_d 、 T_{hs} 的关系如图 3 所示,图中给出了固定温度为 T_{hs0} 时, K_h 随 I_d 变化曲线和固定正向电流 I_{d0} 时, K_h 随 T_{hs} 变化的曲线示意图, γ 为两曲线交点 (T_{hs0}, I_{d0}) 处对应的 $K_h(T_{hs0}, I_{d0})$ 值。由此可得以 T_{hs} 和正向电流 I_d 为变量的发热系数 K_h 模型为

$$K_h(T_{hs}, I_d) = (k_1 T_{hs} + k_2)(k_3 I_d + k_4) / \gamma, \quad (12)$$

其中 k_1, k_2, k_3, k_4 为拟合系数,不同的 LED 封装模组该系数有一定的差异,但都可通过具体光学实验数据拟合获得。将(5)、(12)式代入到(11)式中,可得到以 T_{hs} 和 I_d 为变量的结温 T_j 模型(13)式,其中

$$T_j = T_{hs} + R_j P_{\text{heat}} = T_{hs} + R_j K_h P_d = T_{hs} + R_j (k_1 T_{hs} + k_2)(k_3 I_d + k_4)(aI_d + b) / \gamma. \quad (13)$$

将(13)式代入到(8)式,得到光效的数学模型

$$E = E_0 [1 + k_e (T_j - T_0)] = E_0 \{1 + k_e [T_{hs} + R_j (k_1 T_{hs} + k_2)(k_3 I_d + k_4)(aI_d + b) / \gamma - T_0]\}. \quad (14)$$

将(14)式代入(7)式,可得到光通量以散热片温度 T_{hs} 和正向电流 I_d 为变量的模型表达式如下:

$$\phi = E(aI_d + b) = E_0 \{1 + k_e [T_{hs} + R_j (k_1 T_{hs} + k_2)(k_3 I_d + k_4)(aI_d + b) / \gamma - T_0]\} (aI_d + b). \quad (15)$$

(14)式和(15)式为 LED 的光效和光通量模型,该模型的变量只有散热片温度 T_{hs} 和正向电流 I_d ,其余参数可由已知 LED 芯片的资料给出或通过一次光学实验所获取的实验数据求取。与已有模型相比,所提模型中没有较难检测的结温 T_j 变量和不确定的散热片热阻等参数;原输入功率变量改为正向电流变量,更有利于驱动电路控制策略的优化与实施。从电路角度,模型得到了简化且更为实用。

3 实验方案

为获取模型中所需参数,光学实验所采用的实验装置示意图如图 4 所示。LED 封装模组中的正向电流由外部直流电源提供,改变直流电源的输出电流即可得到不同大小的 LED 正向电流。LED 封装模组置于积分球中并在靠近 LED 芯片的散热片处放置一热电偶,进行散热片温度的检测,温度测量仪监测散热片温度。在通入电流后,当温度测量仪所监测温度到达指定温度时,积分球测量出该温度下的光学实验数据。

散热片温度 T_{hs} 较易测量,再根据正向电流 I_d 大小就可以得到较难测量的结温 T_j 的值。

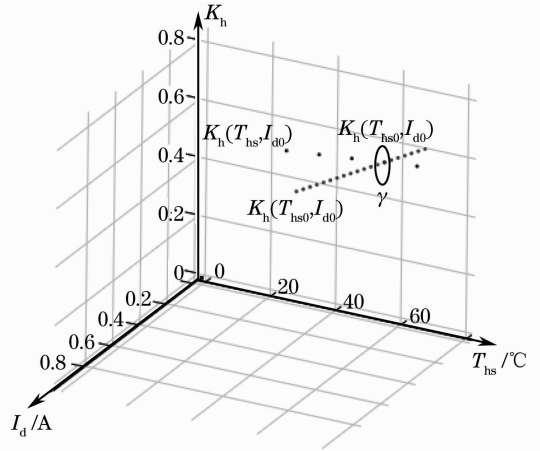


图 3 K_h 与 I_d 、 T_{hs} 的关系曲线示意图
Fig. 3 Relationship between K_h and T_{hs} , I_d

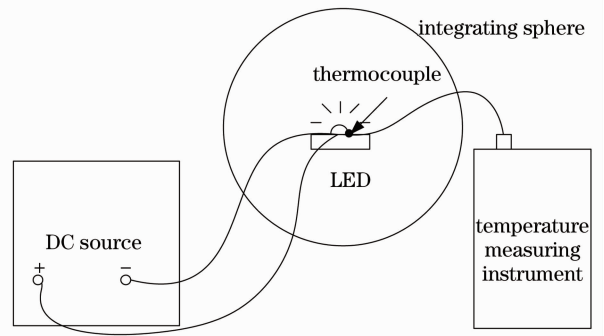


图 4 光学实验装置
Fig. 4 Optical experimental setup

4 实验验证

通过两家不同 LED 生产商的 LED 封装模组进行实验验证,一款为 Cree 公司的 XPG R4,另一款为 Philips Lumileds 公司的 LXML-PWC2,图 5~8 分别为各个温度下的光通量和光效实测值和模型理论值。

1) Cree 公司 XPG R4 封装模组的额定电流为 0.35 A,额定功率 1 W。在散热片温度分别为 50 °C, 60 °C, 70 °C 时,进行不同正向电流下的光电参数测试。通过以上分析过程得到相关的模型参数,具体如表 1~3 所示。

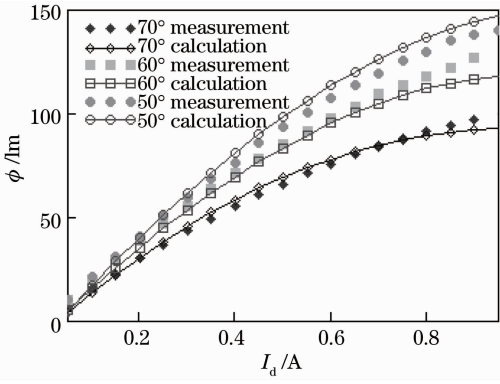


图 5 XPG R4 封装模组光通量实测值与理论值

Fig. 5 Measured and calculated luminous flux of XPG R4

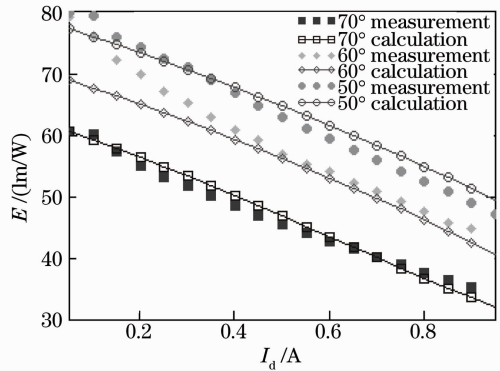


图 6 XPG R4 封装模组各温度下光效实测值与理论值

Fig. 6 Measured and calculated luminous efficiencies of XPG R4

表 1 $T_{hs}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, XPG R4 封装模组模型参数

Table 1 Parameters of XPG R4 when $T_{hs}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$

k_1	k_2	k_3	k_4	γ	a	b	$E_0/(Lm/W)$	$T_0/^{\circ}\text{C}$	$R_j/(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	k_e
0.0049	0.4172	0.1574	0.6964	0.742	3.138	-0.0845	69.282	60.149	15	-0.012

表 2 $T_{hs}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, XPG R4 封装模组模型参数

Table 2 Parameters of XPG R4 when $T_{hs}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$

k_1	k_2	k_3	k_4	γ	a	b	$E_0/(Lm/W)$	$T_0/^{\circ}\text{C}$	$R_j/(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	k_e
0.0049	0.4172	0.1779	0.6081	0.691	3.1337	-0.078	69.282	60.149	15	-0.012

表 3 $T_{hs}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, XPG R4 封装模组模型参数

Table 3 Parameters of XPG R4 when $T_{hs}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$

k_1	k_2	k_3	k_4	γ	a	b	$E_0/(Lm/W)$	$T_0/^{\circ}\text{C}$	$R_j/(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	k_e
0.0049	0.4172	0.173	0.6064	0.663	3.2409	-0.09964	69.282	60.149	15	-0.012

2) Philips Lumileds 的 LXML-PWC2 封装模组的额定电流为 0.7 A, 额定功率 2 W。实验分别测试了散热片温度分别为 50 $^{\circ}\text{C}$, 60 $^{\circ}\text{C}$, 70 $^{\circ}\text{C}$, 不同

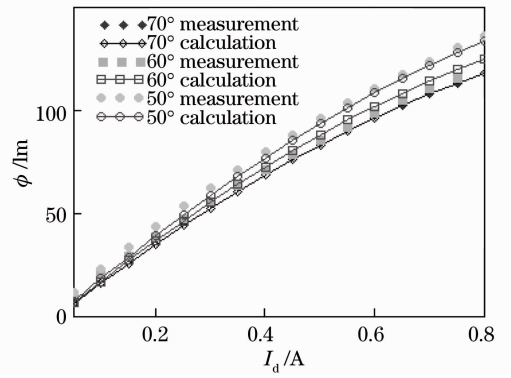


图 7 LXML-PWC2 封装模组各温度下光通量实测值与理论值

Fig. 7 Measured and calculated luminous flux of LXML-PWC2

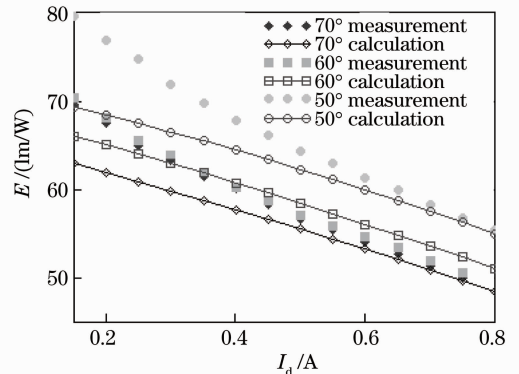


图 8 LXML-PWC2 封装模组各温度下光效实测值与理论值

Fig. 8 Measured and calculated luminous efficiencies of LXML-PWC2

正向电流下的光电参数, 通过以上分析过程得到相关的模型参数, 具体如表 4~6 所示。

表 4 $T_{hs}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, LXML-PWC2 封装模组模型参数Table 4 Parameters of LXML-PWC2 when $T_{hs}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$

k_1	k_2	k_3	k_4	γ	a	b	$E_0/(\text{Lm/W})$	$T_0/^{\circ}\text{C}$	$R_1/(\text{ }^{\circ}\text{C/W})$	k_e
0.0017	0.6336	0.1404	0.6311	0.7524	3.1142	-0.0547	57.313	95.865	30	-0.0055

表 5 $T_{hs}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, LXML-PWC2 封装模组模型参数Table 5 Parameters of LXML-PWC2 when $T_{hs}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$

k_1	k_2	k_3	k_4	γ	a	b	$E_0/(\text{Lm/W})$	$T_0/^{\circ}\text{C}$	$R_1/(\text{ }^{\circ}\text{C/W})$	k_e
0.0017	0.6336	0.1706	0.626	0.7354	3.1273	-0.0563	57.313	95.865	30	-0.0055

表 6 $T_{hs}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, LXML-PWC2 封装模组模型参数Table 6 Parameters of LXML-PWC2 when $T_{hs}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$

k_1	k_2	k_3	k_4	γ	a	b	$E_0/(\text{Lm/W})$	$T_0/^{\circ}\text{C}$	$R_1/(\text{ }^{\circ}\text{C/W})$	k_e
0.0017	0.6336	0.2163	0.5588	0.7184	3.0998	-0.0466	57.313	95.865	30	-0.0055

图 5 和图 7 中的光通量模型理论计算结果和实验结果均表明,在散热片温度 T_{hs} 恒定时,光通量随着正向电流的增加而增加,且在正向电流较小区域内,光通量与正向电流的线性化程度较高;在正向电流较大区域,光通量大小随正向电流的增加而变缓,这是因为 LED 芯片快进入饱和状态;图 5 和图 7 还表明:在相同的正向电流下,散热片温度越高,光通量值就越小。在正向电流较小的区间,温度对光通量的影响不是太大,但随着正向电流的增加,温度对光通量的影响作用非常明显。图 6 和图 8 中的光效模型理论计算结果和实验结果表明,光效随着正向电流的增加会出现较明显下降,这种效率骤减是由于 LED 外量子效率随着电流增加会出现比较大的下降引起的,这也是目前 LED 照明研究中一个重要的需要克服的技术难题;图 6 和图 8 中的结果表明,温度对光效的影响也是很明显的,散热片的温度越高,LED 的光效就越低,这说明随着温度的上升,在 LED 输入的电功率中将有更大部分转化为热功率,这完全符合发热系数随温度升高而增大的规律。

通过以上分析可知,所建立的光电热模型符合实际 LED 随正向电流和温度改变的变化规律。通过图 5~8 的实验结果与模型理论值的对比发现,光通量的模型计算值与实测值较为接近;在正向电流较小的时候,光效模型的计算值与实测值容易出现较大误差,但模型基本能反映光效的变化情况。误差产生的原因主要有以下三点:

1) 为了分析问题的方便,该模型是在 LED 的热阻 R_1 恒定不变的基础上得到的。实际上,随着温度的变化,LED 的热阻也会产生一定变化。

2) 该实验的关键在于温度恒定的控制,LED

芯片的温度随正向电流变化的速度非常快,温度测量仪的监测以及积分球的测量具有一定的延时,且每一次测量的延时并不一定都相同,这将造成所得实验数据对应的温度与实际控制的温度存在一定的偏差,特别是在正向电流较小和较大的两个地方,温度恒定控制较易出现误差。

3) 光学实验过程中发现,当输入电流恒定时,若实验温度控制出现细微偏差时,积分球测量所得的光学参数中,光通量的大小几乎不变,但光功率的大小对温度变化却非常敏感,这是影响发热系数 K_{th} 建模的关键物理量,也是影响光效模型精确度的关键因素。若采用可控温的积分球进行实验,上述现象会得到很大改善,模型的理论值和实测值的误差将进一步减小。

5 结 论

LED 是一个光电热相互作用的多学科混合系统。从电路驱动控制角度,分析提出了一种 LED 光效和光通量的简化变量光电热模型。该模型将 LED 光、电、热几个学科问题有效地综合起来。模型变量为散热片温度和正向电流。其中,散热片温度在实际应用当中较易获得;正向电流是 LED 驱动控制策略中常用的控制对象。研究表明该模型中的光通量模型与实验数据的一致性较好,光效模型在正向电流较小的场合存在一定的误差,但能反映光效的变化规律并且随着温度控制精度的提高,该模型误差将进一步减小。本文所提简化变量的光电热模型可为设计优良光学特性 LED 驱动控制和调光技术提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 M. Schmid, D. Kuebrich, M. Weiland *et al.*. Evaluation on the efficiency of power LEDs driven with currents typical to switch mode power supplies [C]. Proceedings of IEEE Industry Applications Conference, 42nd IAS Annual Meeting, 2007. 1135~1140
- 2 J. Garcia, D. G. Lamar, M. A. Costa *et al.*. An estimator of luminous flux for enhanced control of high brightness LEDs [C]. Proceedings of IEEE PESC, 2008. 1852~1856
- 3 Lei Ruirui, Lü Yijun, Gao Yulin *et al.*. Measurement of the thermo-optic parameters of power LED on pulse current [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 342~345
雷瑞瑞, 吕毅军, 高玉琳等. 脉冲法测试功率 LED 热光参数 [J]. 光学学报, 2009, **29**(s2): 342~345
- 4 M. R. Krames, B. Oleg Shchekin, R. Mueller-Mach *et al.*. Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting [J]. *J. Display Technol.*, 2007, **3**(7): 160~175
- 5 Liu Pei, Chai Guangyue, Guo Lunchun *et al.*. Optoelectric analysis of LED based on different thermal structure [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2011, **22**(6): 46~50
刘沛, 柴广跃, 郭伦春等. 基于不同散热模式 LED 的光电热特性研究 [J]. 照明工程学报, 2011, **22**(6): 46~50
- 6 Chen Huanting, Lü Yijun, Chen Zhong *et al.*. Analysis of thermal spreading boards for high power AlGaInP red LEDs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 805~810
陈焕庭, 吕毅军, 陈忠等. 大功率 AlGaInP 红光 LED 散热基板热分析 [J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 805~810
- 7 C. Biber. LED light emission as a function of thermal conditions [C]. Proceedings of IEEE Semicond. Thermal Meas. Manag., 2008. 180~184
- 8 Chen Yingliang, Lü Yijun, Gao Yulin *et al.*. Photoelectric properties of alternating-current light-emitting diodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3586~3591
陈莹亮, 吕毅军, 高玉琳等. 交流发光二极管光电特性的研究 [J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3586~3591
- 9 S. Y. R. Hui, Y. X. Qin. A general photo-electro-thermal theory for light-emitting-diode (LED) systems [J]. *IEEE Trans. Power Electronics*, 2009, **24**(8): 1967~1976
- 10 X. Tao, Y. R. S. Hui. A general photo-electro-temporal thermal theory for light-emitting-diode (LED) systems [C]. Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010. 184~191
- 11 J. M. Zhou, W. Yan. Experimental investigation on the performance characteristics of white LEDs used in illumination application [C]. Proceedings of IEEE PESC, 2007. 1436~1440
- 12 Cheng Ting. Investigation on Thermal Characteristics of High Power White LEDs Devices [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009
程婷. 大功率白光 LED 照明器件中散热问题的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009
- 13 T. Zahner. Thermal management and thermal resistance of high power LEDs [C]. Proceedings of IEEE 13th Int. Workshop Thermal Investigation ICs Syst., 2007. 195~195
- 14 Yi Zechun, Xiong Wang, Wang Li *et al.*. Thermal analysis of multi-chip package of high power LEDs [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, **32**(3): 320~324
蚁泽纯, 熊旺, 王力等. 大功率 LED 多芯片集成封装的热分析 [J]. 半导体光电, 2011, **32**(3): 320~324
- 15 Yaxiao Qin, Deyan Lin, S. Y. (Ron) Hui. A simple method for comparative study on the thermal performance of LEDs and fluorescent lamps [J]. *IEEE Trans. Power Electronics*, 2009, **24**(7): 1811~1818
- 16 Huanting T. Chen, Xuehui H. Tao, S. Y. Ron Hui. Estimation of optical power and heat-dissipation coefficient for the photo-electro-thermal theory for LED systems [J]. *IEEE Trans. Power Electronics*, 2012, **27**(4): 2176~2183
- 17 A. Poppe. A step forward in multi-domain modeling of power LEDs [C]. Proceedings of IEEE Semicond. Thermal Meas. Manag. Symp., 2012. 325~330
- 18 N. Catalin, S. Paul, R. Marius. Electro-thermal modeling of power LED using SPICE circuit solver [C]. Proceedings of IEEE 35th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2012. 329~334
- 19 P. Baureis. Compact modeling of electrical, thermal and optical LED behavior [C]. Proceedings of IEEE 35th European LED Behavior Solid-State Device Research Conference, 2005. 145~148

栏目编辑: 韩峰