材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.016

采用动态差分模型表征脉冲驱动LED电热特性

郭　杰[1*]，饶　丰[2]，张美凤[1]，褚　静[1]

（常州工学院 1. 光电工程学院；2. 创新创业学院，江苏 常州 213032）

摘　要： 为了研究不同驱动方式下LED结温的差异性，依据LED热结构模型，从功率传递角度构建了差分型LED电-热动态模型，利用相同平均功率、不同频率的注入电功率，计算脉冲驱动条件下的LED结温。同时，采用正向电压法测量实际结温，对模型预测结温的准确性进行了分析。研究表明，差分模型能够表征脉冲驱动方式下LED电热特性，其理论预测值与实测值误差约为4 ℃，基本能够满足工程应用要求。更有意义的是，采用差分模型，能够分析在特定驱动条件下，LED热容、热阻等参数对结温的影响，为不同驱动模式下LED个性化结构设计提供了理论基础。

关键词： LED；结温特性；电热差分模型；脉冲驱动

中图分类号： TN312^{+}.8　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0385－05

Study on Electro-thermal Characteristics of Pulse-driven LED Based on Dynamic Electric-thermal Difference Model

GUO Jie[1], RAO Feng[2], ZHANG Meifeng[1], CHU Jing[1]

(1. School of Optoelectron. Engin.; 2. School of Innovation and Entrepre., Changzhou Institute of Technol., Changzhou 213032, CHN)

Abstract: In order to study the difference of LED junction temperature under different driving modes, a difference electro-thermal dynamic model of pulse-driven LED was constructed from the perspective of power transfer according to the thermal structure model. And then, the junction temperature was calculated with injected powers which have same average power and different frequency. Lastly, the actual junction temperature was measured by forward voltage method for theoretical verification. The results show that the difference model can characterize the electro-thermal characteristics of pulse-driven LED, and the error between the predicted value and the measured value is about 4 ℃, which can basically meet the requirements of engineering applications. Furthermore, this model can be used to analyze the influence of LED heat capacity and thermal resistance on junction temperature under specific driving conditions, which provides a theoretical basis for LED design under different driving modes.

Key words: LED; junction temperature characteristic; electro-thermal difference model; pulse-driven

0　引言

半导体发光二极管（Light Emitting Diode，LED）被认为是最有潜力的新一代光源，已经广泛地应用于照明与显示领域。LED的光色电性能、寿命及可靠性随着结温的升高而显著劣化[1-3]，因此，采用有效方法降低结温，对LED照明与显示系统的设计，具有重要意义。

目前，常用的LED驱动方式为恒流驱动和脉冲驱动。为研究驱动模型对LED光色电特性的影响，研究人员开展了相关测量研究。王信泽等[4]研究了不同波形电流对LED正向电压、光通量、光效、色温等参数的影响，实验结果表明采用脉冲驱动对色温、

收稿日期：2021－03－07.

基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFF0210002)；江苏省产学研合作项目(BY2020485)；江苏省“333”人才项目(BRA2019157).

* 通信作者：郭　杰

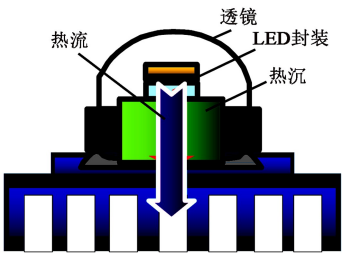
正向电压的影响低于恒流驱动；刘旭文等[5]测量了不同占空比电流和环境温度下 LED 峰值波长的变化情况，发现在同一温度下，采用脉冲驱动时峰值波长变化明显小于恒流驱动；Yang 等[6]设计了 LED 脉冲驱动实验装置，并对不同占空比电流与结温、光效的关系进行测量。研究表明，在同一实验条件下，采用脉冲驱动对峰值波长、色温、正向电压的影响均低于恒流驱动；采用正向电压法测量结温时，在相同的注入平均功率下，采用脉冲驱动时的结温低于恒流驱动。一些学者对 LED 光电热理论也进行了探索。徐玉珍等[7]分析了 LED 在散热片恒定情况下正向电流和输入功率的关系，提出了简化光电热模型；Chen 等针对荧光粉转换型 LED 提出双向热阻模型[8]和光电热模型[9]，对其输入功率、结温、电流、光谱峰值波长之间的关系进行了探讨。然而，目前 LED 光电热理论模型中还未见驱动方式的差异性探讨，脉冲和恒流模式对 LED 结温影响的差异性还需要进一步深入研究。

本文从 LED 热结构出发，从热功率传递角度，分析单颗 LED 结构的等效热阻和热容，建立 LED 注入电功率与热结构参数、结温之间的关系，并通过等效离散得到 LED 脉冲驱动下的光电热差分方程，研究了不同热阻、不同热容和不同波形脉冲驱动下的 LED 结温特性，并与实测结温进行比较。

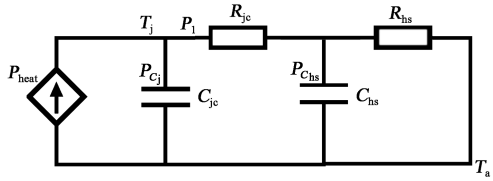
1 LED 电热差分动态模型基本原理

1.1 理论模型

带铝基板的单颗 LED 热传导路线如图 1(a)所示，pn 结电子和空穴的非辐射复合将部分电功率以晶格振动的形式转化为热能，LED 芯片和热沉接触在一起，当两者存在温度梯度时，热量从芯片通过微观粒子的热运动或晶格振动传递至热沉，将 LED 热结构简化为如图 1(b)所示等效图模型[10-11]。图中 P_{heat} 为 LED 发出的热功率总和，R_{jc} 和 C_{jc} 分别为 LED芯片的等效热阻和热容，R_{hs} 和 C_{hs} 分别为热



(a) LED 热传导路线



(b) 热结构等效简化图

图 1 LED 热传导路径及热结构等效简化图

沉的等效热阻和热容，T_j 为 pn 结温度，T_{hs} 为热沉表面温度，T_a 为环境温度。

LED 发出的热功率总和 P_{heat} 通常可以描述为[11]

$$P_{heat}=k_h P_d \tag{1}$$

其中，P_d 为 LED 的电功率，k_h 为电致发光过程中的热损耗系数。

流向 LED 芯片等效热容 C_{jc} 的热功率 P_{C_j} 表达为

$$P_{C_j}=k_h P_d - P_1 \tag{2}$$

根据热容定义，P_{C_j} 还可表达为

$$P_{C_j}=C_{jc}\frac{d(T_j-T_a)}{dt} \tag{3}$$

流向 LED 等效热阻的热功率 P_1 为[12]

$$P_1=\frac{T_j-T_{hs}}{R_{jc}} \tag{4}$$

根据式(2)～(4)，可得：

$$C_{jc}\frac{d(T_j-T_a)}{dt}=k_h P_d-\frac{T_j-T_{hs}}{R_{jc}} \tag{5}$$

即：

$$\frac{dT_j}{dt}+\frac{1}{C_{jc}R_{jc}}T_j=\frac{k_h P_d}{C_{jc}}+\frac{T_{hs}}{C_{jc}R_{jc}} \tag{6}$$

根据热量传递过程，LED 等效热阻功率还可以表达为

$$P_1=P_{C_{hs}}+P_2 \tag{7}$$

其中，$P_{C_{hs}}$ 为传入热沉的热容功率，P_2 为流入热沉的热阻功率，分别为

$$P_{C_{hs}}=C_{hs}\frac{d(T_{hs}-T_a)}{dt} \tag{8}$$

$$P_2=\frac{T_{hs}-T_a}{R_{hs}} \tag{9}$$

由式(4)，(7)，(8)，(9)，可得：

$$\frac{dT_{hs}}{dt}=\frac{1}{C_{hs}R_{jc}}T_j-\frac{R_{hs}+R_{jc}}{C_{hs}R_{hs}R_{jc}}T_{hs}+\frac{T_a}{C_{hs}R_{hs}} \tag{10}$$

式(6)和(10)科学地揭示了 LED 热结构。当注入电功率 P_d 为离散型脉冲时，微分方程无法直接应用，

通过离散方式，建立差分方程：

令：

$$\frac{\mathrm{d}T_j}{\mathrm{d}t} \sim \frac{T_j(n)-T_j(n-1)}{\Delta t}\Delta t \to 0 \tag{11}$$

则：

$$\frac{T_j(n)-T_j(n-1)}{\Delta t}+\frac{1}{C_{jc}R_{jc}}T_j(n)=\frac{k_h P_d(n)}{C_{jc}}+\frac{T_{hs}(n)}{C_{jc}R_{jc}} \tag{12}$$

$$\frac{T_{hs}(n)-T_{hs}(n-1)}{\Delta t}=\frac{1}{C_{hs}R_{jc}}T_j(n)-\frac{R_{hs}+R_{jc}}{C_{hs}R_{hs}R_{jc}}T_{hs}(n)+\frac{T_0}{C_{hs}R_{hs}} \tag{13}$$

这样就构建了 LED 电热差分型动态模型。当采用离散脉冲驱动 LED 时，根据被测类型 LED 热结构参数（R_{jc}，C_{jc}，R_{hs}，C_{hs}），采用式(12)和(13)，输入不同驱动模式下的功率 $P_d(n)$，就可以得到不同时刻的结温 T_j 和热沉温度 T_{hs}。

1.2　关键参数的求解方法

在分析前，需要在专业实验室测量出 LED 器件的结构参数。本研究在半导体照明联合创新国家重点实验室常州基地完成热结构参数（R_{jc}，R_{hs}，C_{jc}，C_{hs}）的测量。本实验采用单颗白光 LED 为样品，其额定功率为 1 W，型号为 Cree 公司 XRE-Q5 型 GaN 基白光 LED，环境温度为 25 ℃，样品的热结构参数测量结果见表 1。

表 1　部分 LED 样品热结构参数

样品号	参数				
	k_h	R_{hs}/（℃/W）	R_{jc}/（℃/W）	C_{jc}/（$\times10^{-6}$ J/℃）	C_{hs}/（$\times10^{-6}$ J/℃）
LED1	0.904	10.2	15.4	0.02	45
LED2	0.908	10.4	13.5	0.02	
LED3	0.901	10.2	13.2	0.02	

不同 LED 热容应不同，但是同型号 LED 之间热容差异很小[13]，本研究也只研究热容对结温的影响，不研究不同 LED 热容差异对结温差异的影响，这里同一型号 LED 其热结构参数采用均一值。

通过求解差分方程组(12)和(13)，从理论上分析不同驱动模式对结温的影响。具体求解过程如下：

(1)输入表 1 中 LED 样品的热结构参数，对差分方程组参数进行初始化；

(2)设置初始值 $i=1$，$T_j(0)=T_{hs}(0)=T_a(0)$，测量注入电功率 $P_d(1)$；

(3)求解方程组中 $T_j(1)$和 $T_{hs}(1)$的值；

(4)迭代求解所有 $P_d(i)$对应的 $T_j(i)$和$T_{hs}(i)$值，直到 $i=n$；

(5)对所有 $T_j(n)$和 $T_{hs}(n)$进行稳态平均，得到结温 T_j 和热沉温度 T_{hs}。

2　实验

如图 2 所示，本实验采用杭州远方公司的 TRA-200 对 LED 的瞬态电功率和稳态结温进行测量，结温测量误差控制在 0.1 ℃内。

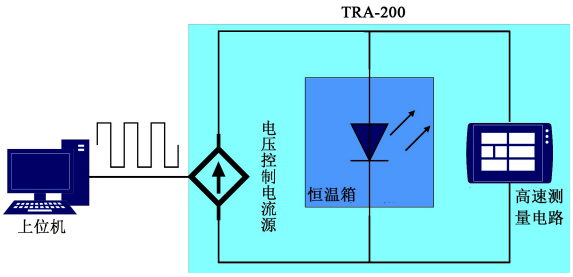


图 2　测量系统框图

稳态结温测量方法是正向电压法，步骤分为两部分。一是结温与正向电压关系标定。采用 1%额定电流驱动 LED，改变环境温度，从 10～80 ℃，间隔为 10 ℃。当驱动电流很小时，可忽略自加热影响[11]，将环境温度视为结温，从而得到结温与正向电压的关系。二是结温测量。采用驱动电流点亮 LED，通过固态继电器将驱动电流瞬间（10^{-6} s 内）切换至 1%额定电流，测量正向电压。然后，可结合标定曲线，得出被测结温。

3　结果与讨论

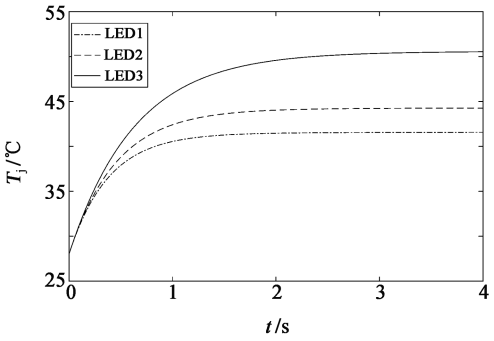
3.1　恒流驱动时热阻与热容对结温的影响

LED 的输出特性与正向输入电流存在密切关系。采用恒流驱动时，结温随着时间的增长而升高，当达到热平衡时，结温平均值基本保持不变。

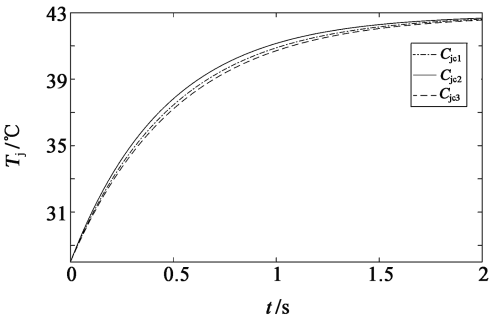
图 3 是采用差分方程计算得到的结温变化图，其中，图 3(a)是三只不同热阻 LED 的结果，图 3(b)是三只热阻相同但热容不同 LED 的结果。可以看出，在恒流驱动条件下，热阻对 LED 最终结温的影响明显，热容对最终结温影响较小，但是影响结温上升的速度。同型号 LED 热容差异比较小，导致结温变化速度差异也很小。

图 4 是实测的三只 LED 亮灯 2 s 时的结温。可以看出，三只 LED 的结温的确不同，由于能够比较准确地测量 LED 热阻，与图 3 的理论值相比，实测

值误差不超过 4 ℃。说明本模型计算恒流驱动下的结温比较准确。



(a) 不同热阻



(b) 不同热容

图 3 采用模型分析热阻与热容对结温的影响曲线

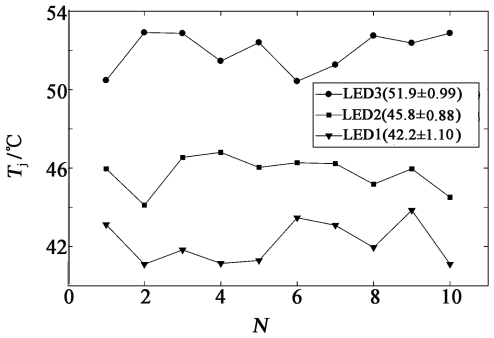
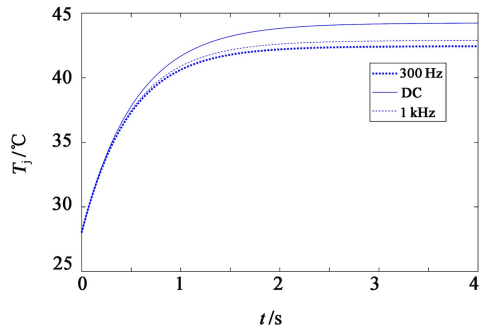


图 4 三只 LED 实测结温

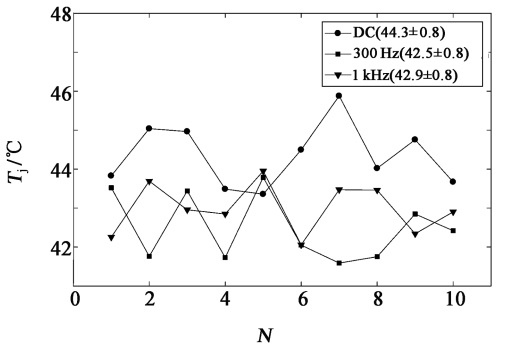
3.2 脉冲驱动对 LED 结温的影响

实际使用过程中，LED 常采用脉冲方式驱动。研究表明，在相同注入功率下，脉冲驱动时光效高于恒流驱动，结温也低于恒流驱动[5,7]。本研究试图通过模型分析，从理论上解释这一现象。图 5(a)是在相同的平均注入功率下，分别采用恒流驱动 300 和 1 000 Hz 的脉冲驱动时结温随时间的变化。可见，恒流驱动结温最高，脉冲驱动时，结温相对较低。但是频率的差异对结温的影响较小，理论值仅为 0.3 ℃，小于测量不确定度。

图 5(b)是分别采用三种驱动方式，单颗 LED 亮灯 2 s 时的实测结温。可以看出，恒流驱动时 LED 的结温普遍较高。在统计学中，p 值是代表差异显著性的参数，当 $p>0.05$ 时，表明差异性不明显；当 $0.01<p<0.05$ 时，表示差异性显著；当 $p<0.01$ 时，表示差异性极为显著。经 SPSS 数据统计软件分析，结果表明：$p<0.05$，表明恒流驱动结温从统计上明显高于脉冲驱动。但是 300 和 1 000 Hz 脉冲驱动结温差异不明显，采用 SPSS 分析 $p=0.665$，表明二者交织在一起，不具备统计差异性，无法说明何种频率下结温更低。



(a) 模型计算



(b) 实测结果

图 5 不同驱动方式对 LED 结温的影响

3.3 讨论

不同学者在不同实验室均发现，同一注入功率下，脉冲驱动时 LED 结温低于恒流驱动或光效高于恒定电流[5,7,12]。从结温与热阻的关系很难解释这一现象。本研究从 LED 电热模型出发，采用差分方程从理论上分析驱动方式对结温的影响，充分考虑热阻和热容的作用。分析发现热容在脉冲驱动时具有明显作用，是脉冲驱动时结温较低的关键因素。

本论文的研究仅仅针对单一型号 LED，今后还需要扩大研究范围，研究是否具有普遍意义。另外，本文研究也带来了一个新的问题：目前普遍认为，降低热阻是减小结温的最佳方法。随着 LED 技术的发展，脉冲驱动越来越普遍，是否可以根据驱动方式，合理设计热阻和热容？

4　结论

目前报道的 LED 电热模型一般考虑输入为恒流电源，不能用于研究输入电流形式对 LED 热性能的影响。本文在简化 LED 热结构的基础上，按热传导路线，从热功率传递角度，建立注入功率与热结构参数、电流、时间的关系，采用约束条件和等效离散方式，构建差分方程组描述脉冲驱动条件下的 LED 电热模型，提出了一种离散脉冲驱动下 LED 结温的测量方法，从理论上分析了不同驱动方式对结温的影响，并与正向电压法实测结果进行比对。结果表明，本文提出的模型预测结果与实测值误差不超过 4 ℃，具有较高的准确度；同时，LED 结构参数对 LED 结温影响程度不同，LED 热容对 LED 最终结温的影响小于热阻，但对结温上升速度存在较大影响。本研究对相同热阻水平的脉冲驱动 LED，为进一步降低其结温提供了一种新的思路，具有重要的理论意义和应用价值。

参考文献：

[1] 张　波，俞安琪. LED 结温与光色参数的关系及结温极限[J]. 照明工程学报，2018，29(1)：29-33.
Zhang Bo，Yu Anqi. The relationship between junction temperature and color parameters of LED and limit of junction temperature[J]. China Illuminating Engin. J.，2018，29(1)：29-33.

[2] 王潇洵. LED 照明产品加速测试中结温测量及寿命预测修正方法研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2019.
Wang Xiaoxun. Research on correction method of junction temperature measurement and life prediction in LED lighting accelerated testing[D]. Changchun：Changchun Institute of Optics，Fine Mechanics and Physics，Chinese Academy of Sciences，2019.

[3] 沈雪华，陈焕庭，陈赐海，等. 白光 LED 光谱特性及司辰节律因子[J]. 发光学报，2019，40(12)：1514-1522.
Shen Xuehua，Chen Huanting，Chen Cihai，et al. Spectral characteristics and circadian action factor of white LEDs[J]. Chinese J. of Luminescence，2019，40(12)：1514-1522.

[4] 王信泽，徐玉珍，林维明. 基于不同电流波形下大功率 LED 芯片光电热性能研究[J]. 电工电气，2015(4)：5-9，26.
Wang Xinze，Xu Yuzhen，Lin Weiming. Study on photoelectric thermal performance of high-power LED chip based on different current waveforms[J]. Electrotechnics Electric，2015(4)：5-9，26.

[5] 刘旭文，林上飞，刘木清. 环境温度和驱动电流对 LED 的峰值波长的影响[J]. 照明工程学报，2020，31(1)：26-31.
Liu Xuwen，Lin Shangfei，Liu Muqing. The influence of temperature and driving current on the peak wavelength of LED [J]. China Illuminating Engineering J.，2020，31(1)：26-31.

[6] Yang N G M，Shieh B Y R，Zeng T F Y，et al. Analysis of pulse-driven LED junction temperature and its reliability[C]// IEEE 2018 15th China Inter. Forum on Solid State Lighting：International Forum on Wide Bandgap Semiconductors，2018：1-3.

[7] 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)：222-228.
Xu Yuzhen，Lin Weiming. A novel LED photo-electro-thermal model with simplified variables[J]. Acta Optica Sinica，2013，33(5)：222-228.

[8] Chen H T，Tan S C，Hui，et al. Analysis and modeling of high-power phosphor-coated white light-emitting diodes with a large surface area[J]. IEEE Trans. on Power Electron.，2015，30(6)：3334-3344.

[9] Chen H T，Lee A T L，Tan S C，et al. Electrical and thermal effects of light-emitting diodes on signal-to-noise ratio in visible light communication [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics，2019，66(4)：2785-2794.

[10] Poppe A，Farkas G，Szekely V，et al. Multi-domain simulation and measurement of power LEDs and power LED assemblies [C]// Twenty-Second Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium，2006：191-198.

[11] 张晶晶，张　涛，郑　奇，等. 大功率 LED 在线性及 PWM 调光下的电光转换效率及热分析[J]. 光电子·激光，2013，24(1)：50-55.
Zhang Jingjing，Zhang Tao，Zheng Qi，et al. Radiant efficiency and thermal analysis of high-power LEDs at linear and PWM dimming modes[J]. J. of Optoelectronics·Laser，2013，24(1)：50-55.

[12] 温怀疆，牟同升. 脉冲法测量 LED 结温，热容的研究[J]. 光电工程，2010，37(7)：53-59.
Wen Huaijiang，Mou Tongsheng. The measurement of LED junction temperature and thermal capacity using pulse current [J]. Opto-Electronic Engin.，2010，37(7)：53-59.

作者简介：

郭　杰(1982－)，女，博士，讲师，研究方向为 LED 光色电检测技术、智能检测与模式识别等。