

交流发光二极管热特性的模拟分析

邓 辉 吕毅军 高玉琳 朱丽虹 陈莹亮 林 岳 郭自泉 王 凯 陈国龙 陈 忠

(厦门大学电子科学系福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要 由于交流发光二极管(AC-LED)在实际应用中无需交流/直流整流变压器,它的发展越来越被关注。随着器件功率的增大,芯片结温升高,对器件的光通量、光功率及寿命等产生负面影响,所以精确掌握 AC-LED 的温升规律就成为芯片设计的关键。运用 FloEFD 有限元软件进行模拟仿真 1 W 白光 AC-LED 分别在直流和交变功率驱动下的瞬态热特性,结果表明在加载交变信号情况下,器件结温会以直流信号的结温为中心周期振荡,振荡的频率与输入功率频率相同,但有明显的相位移动。同时,AC-LED 在不同的输入功率和频率下的结温变化显示稳态时的平均结温和结温振荡幅度都随功率的增大而线性上升,但随着频率的增大而降低。

关键词 光学器件;交流发光二极管;热仿真;结温;热阻

中图分类号 TN312+.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0623001

Thermal Simulation of Alternating Current Light Emitting Diodes

Deng Hui Lü Yijun Gao Yulin Zhu Lihong Chen Yingliang Lin Yue Guo Ziquan
Wang Kai Chen Guolong Chen Zhong

(Fujian Engineering Research Center for Solid-State Lighting, Department of Electronics Science,
Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract Alternating current light emitting diodes (AC-LED) have attracted more and more attentions due to the advantage of free of alternate current (AC)/direct current (DC) converter in practical application. With the increase of input power, the rising junction temperature will have negative influence on the the luminous flux, the optical power, the lifetime and other parameters of LED. Therefore, the understanding of the principle of accurate temperature rise of AC-LED is the key to the chip design. The finite-element analysis software (FloEFD) is used to simulate the transient thermal properties of 1 W white AC-LED driven by DC and AC power respectively. The results show that the junction temperature of AC-LED driven by AC power, fluctuates periodically around that driven by DC power and the fluctuation frequency is the same as that of the input signal, but with an apparent phase shift. Meanwhile, the variation of junction temperature of AC-LED driven at different powers and frequencies shows that the average junction temperature and its fluctuation amplitude increases linearly with the input power at steady state, however, decreases with the increase of frequency.

Key words optical devices; alternating current light emitting diodes; thermal simulation; junction temperature; thermal resistance

OCIS codes 230.1150; 230.2090; 230.3670; 230.5170

1 引 言

固体照明是一种全新的照明技术,它具有节能、环保、寿命长、免维护和易控制等特点,近年来发展迅速,广泛应用于背光源、汽车灯和普通照明^[1,2]。

迄今为止,研究最多的是传统直流驱动 LED^[3,4],当其使用一般交流电源(AC)时,还必须配备整流变压器进行交流/直流(AC/DC)转换,在转换过程中不但耗损了 15%~30% 的电力,还增加了 LED 灯具

收稿日期: 2011-11-04; **收到修改稿日期**: 2012-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(11104230)和福建省产学研重大科技项目(2011H6025)资助课题。

作者简介: 邓 辉(1984—),男,硕士研究生,主要从事半导体照明热学方面的研究。E-mail: budong0823@126.com

导师简介: 高玉琳(1969—),女,博士,副教授,主要从事半导体材料光学性质和半导体照明检测等方面的研究。

E-mail: ylgao@xmu.edu.cn(通信联系人)

的成本。近年来出现了直接以交流电源驱动的 AC-LED 最早的结构是将 2 颗同等功率的芯片正反焊接,每个半周期都只有一颗芯片点亮^[5];为了提高芯片使用率,Yen 等^[6]利用惠斯通电桥结构设计芯片,增加了偏置方向上的辐射面积,使得半个周期里更多的芯片能点亮。目前,各研究机构在 AC-LED 芯片的结构和工艺上取得了更多的进展,Ao 等^[7]利用双层互联和空气桥工艺设计出了一种能在较高的交流电压下工作的蓝光 LED;Jaehae Cho 等^[8]在惠斯通电桥结构基础上加以改进,增加了电桥上 DC-LED 的数量,使得工作时大部分芯片都处于点亮状态,不仅节约了成本,还减少了频闪的现象。

迄今为止,大部分研究都只关注 AC-LED 的结构及光电特性^[9],然而器件的热学特性却被提及得很少,过高的结温不但会减短器件的寿命,还会降低产品的可靠性以及影响使用性能,因此,热学特性的研究已经成为 AC-LED 产品设计和封装的关键。Zong 等^[10]利用电流和结温线性关系的特性,调节热沉温度使芯片加热前后的有效电流相等可以测出芯片结温。由于结温在第一个半周期由于自加热温升大,测量结果误差大;另一方面结温与正向电流之间存在相位差,并不是同步的,这种方法测出的也不是平均结温。Hwu 等^[11]利用阈值电流与温度的线性关系,分别测出 AC-LED 开始时和达到稳定时的

阈值电流,进而计算出温度的变化值,再用热电偶测出器件底部温度就可以计算出芯片平均结温。但是由于仪器的精度和测量阈值电流操作上的及时性、交变正弦电流的噪声都会引起误差,导致结果不准。上述研究都是参照 DC-LED 的电学测试方法去测量 AC-LED 的结温,结果不够理想,误差大,并且芯片和器件内部的温度分布及变化规律无法得知。

本文基于有限体积数值计算方法对 AC-LED 进行瞬态热学的模拟分析,通过对 AC-LED 在直流信号驱动下的模拟和实验结果分析比对,验证了热学模型的准确性,然后比对了不同输入平均功率、不同频率下的瞬态温升曲线,研究了 AC-LED 的瞬态热学特性。

2 器件结构

选用以蓝宝石(Al_2O_3)为衬底的 GaN 基 AC-LED(电驱动特性约为 $110\text{ V}@60\text{ Hz}$)进行仿真分析,器件采用传统功率型封装结构,如图 1 所示。铜层与衬底之间为银胶层,铜层利用硅胶连接铝基板。在仿真过程中,铝基板下表面设定为环境温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$,且设为真实墙体,在试验测试中,将器件安装在散热良好的控温热沉上。

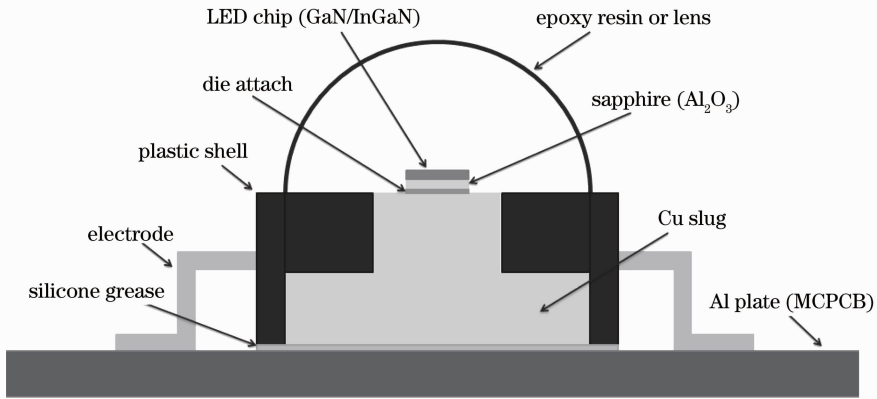


图 1 1 W 功率型 AC-LED 结构

Fig. 1 Structure of AC-LED with power of 1 W

3 热学模型

LED 的结构决定了其热传导过程复杂,存在多个传导路径,且涉及多个交界面和多种材料,但是芯片产生的热量主要通过垂直通道散出,垂直路径为,芯片层→铜层→铝基板(MCPCB)→环境^[12],因此可将其视为串联的热阻路径,热学模型如图 2(a)所

示,其中 R_{JA} 表示为从芯片层到外界空气这一传导路径的总热阻, R_{JS} 为芯片层、银胶到金属块之间的热阻, R_{SB} 为铜层、硅胶到 MCPCB 之间的热阻, R_{BA} 为 MCPCB 到外界环境间的热阻。根据热学模型,建立图 2(b)所示的仿真模型,铜层由上下两个不同圆柱体组成,各结构材料的参数如表 1 所示。

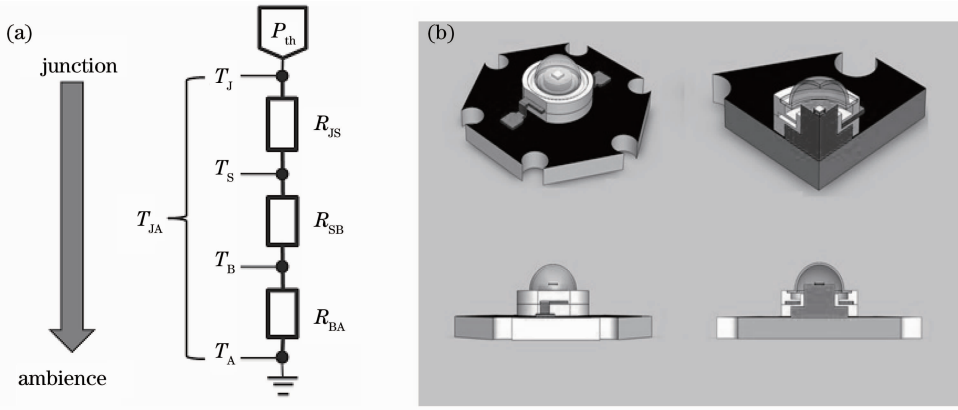


图 2 AC-LED 的热学模型和结构。(a)热学模型；(b)仿真模型结构

Fig. 2 Thermal model and model structure of AC-LED. (a) Thermal model; (b) simulation-model structure

表 1 模型中各结构材料的参数

Table 1 Parameters of the structure materials in the model

Materials	Size (length×width×thickness) /mm	Thermal conductivity /($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Chip	1.00×1.00×0.10	140.00
Sapphire	1.00×1.00×0.08	50.00
Die attach	1.00×1.00×0.02	7.50
Cu slug	Up: $\Phi 3.20 \times 2.00$ Down: $\Phi 6.00 \times 1.00$	285.00
Si Grease	Thickness is 0.20	1.50
Al plate	Thickness is 2.00	170.00

在仿真过程中做了如下设置：1) LED 芯片是采用多颗微芯片的集成形式，为了简化模型，分析时把它作为一个整体平面均匀热源，且不考虑涂覆在芯片表面的荧光粉；2) 环境温度和 LED 的初始温度为 25 ℃，铝基板下表面设定为可进行热交换的真实墙体，温度为 25 ℃；3) 将计算域内的初始温度设定为环境温度，有利于模拟铝基板表面与环境的热交换；4) 器件热功率主要通过热传导和热对流的方式从铜层、铝基板扩散到环境中，管壳及透镜的热辐射能力极差，因此器件表面设定为非辐射表面。器件散热过程比较复杂，并非只有单一的垂直路径，但是除了垂直通道之外的其他路径的散热量非常微小，因此在分析中器件的散热通道只考虑垂直通道，其路径为，芯片层→铜层→铝基板→环境。

4 模拟结果及分析

由于 LED 热阻测量目前均采用电学测试方法，该方法是基于直流状态下的测量，因此目前在实际使用中还无法在交流状态下直接测试 AC-LED 热阻，只能以直流状态下的测量结果为参考，对 AC-LED 在交流状态下仿真得到的结果目前还不能直接验证。因此，为了验证热学模型的准确性以及模拟仿真内容的可靠性，将其与在直流信号驱动下的

AC-LED 的模拟和实验结果进行了对比。

首先对 AC-LED 的热学模型在 0.8 W 热平均功率的直流信号下进行了计算机仿真，得到了该器件不同结构层的热场分布，如图 3 所示。根据器件内部各层的温度分布，可推算出每一层的热阻值为

$$R_{th} = \Delta T / P_e, \quad (1)$$

式中 R_{th} 是热阻， ΔT 是温差， P_e 是途径的热功率。

然后通过匈牙利公司 T3ster II eraLED 热阻测试系统测试了该器件在 1 W 功率下的瞬态降温曲线，得到了它的结构函数曲线。分析该结构函数曲线，划分出器件内部结构的热阻，如图 4 所示，并与图 3 的仿真值做比较。

表 2 为实验和模拟仿真的结果，通过比较发现两者存在一定的误差，这是由于器件的结构材料的热导率会随温度的改变而变化^[13,14]。但是在模拟仿真中把材料的热导率设置为不变量，所以测量的热阻有误差，但是误差都很小，在 1% 左右。只有铝基板误差达到 16%，这是因为实验时器件要置于控温热沉上，铝基板与热沉之间要涂抹导热硅脂以消除空隙，由于导热硅脂的导热性能差，一定厚度的导热硅脂使得铝基板底部的温度要明显高于热沉温度，而模拟时把铝基板下表面设置为环境温度，使得铝基板温度以及结温都比模拟值高。因此，实验测

量得到的 p-n 结到环境的热阻值为 12.30 K/W, 比模拟获得的热阻值 12.17 K/W 大, 但是误差仅为 1.05%, 这证实了热学模型的可靠性和真实性。因

此, 利用此热学模型对 AC-LED 进行的热特性研究具有一定的可行性和参考意义。

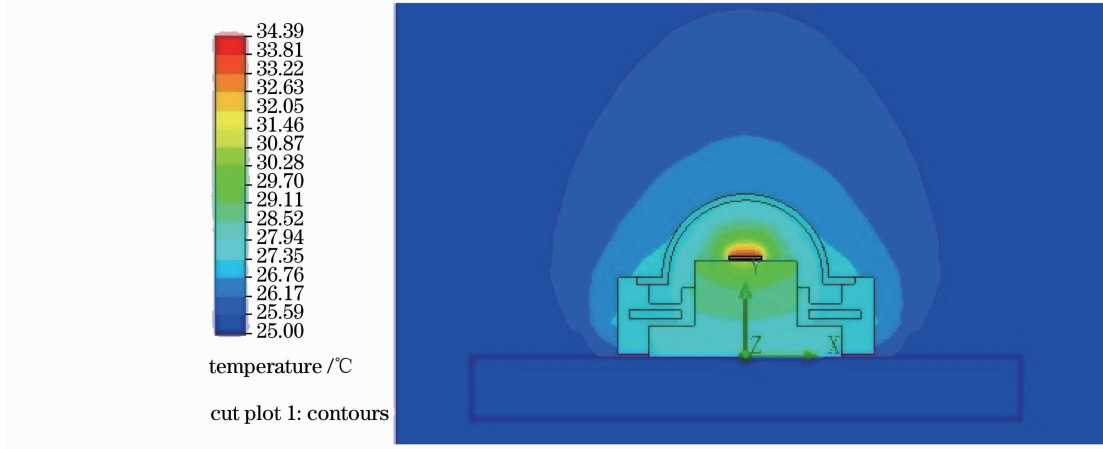


图 3 1 W 功率型 DC-LED 热场分布

Fig. 3 Thermal-field distribution of DC-LED with power of 1 W

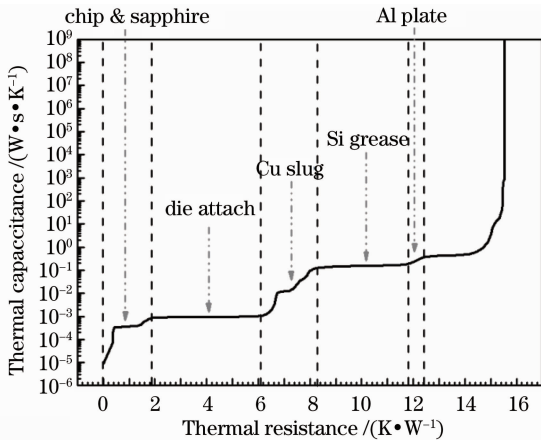


图 4 1 W 功率型 DC-LED 积分结构函数

Fig. 4 Integration structural function curve of DC-LED with power of 1 W

表 2 功率型 LED 各层结构的热阻值

Table 2 Thermal resistance of each layer in power LED

Structure	Thermal resistance / (K·W ⁻¹)		
	Experiment	Simulation	Deviation / %
Chip		0.29	
Sapphire	1.91	1.60	1.06
Die attach	4.20	4.22	0.48
Cu slug	2.20	2.19	0.45
Si Grease	3.55	3.51	1.13
Al plate	0.50	0.42	16.0
Rth(j-a)	12.30	12.17	1.06

在直流模拟的基础上, 对 AC-LED 的热学模型在 110 V、60 Hz 的交变信号驱动下, 输入 0.8 W 热功率, 对 AC-LED 结温的瞬态变化特性进行了仿

真, 为了直观清晰地阐述它的特点, 将它与直流信号驱动下的模拟温升曲线进行对比, 如图 5 所示。

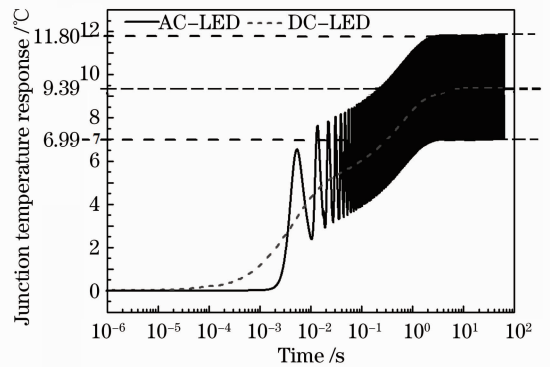


图 5 AC-LED 仿真模型的瞬态特性曲线

Fig. 5 Transient temperature curves of AC-LED and DC-LED

由图 5 可知, AC-LED 结温在变化过程中会以一定频率上下振荡, 总体趋势在增大, 最后达到稳态不变, 此时, 最大温升为 11.80 °C, 最小温升为 6.99 °C, 振荡温差达 4.81 °C, 这是由于驱动电压是交变电压, 加载在芯片上的功率会周期性振荡, 但是与直流信号驱动下的结温上升快慢基本一致, 达到稳态的时间以及稳态时的平均结温也大致相同, 这是由于它们有相同的器件参数及材料结构决定的。器件要在这样的温度变化下正常工作对材料的要求比较高, 不然就会影响器件的性能以及可靠性等, 无形中对 AC-LED 产品开发提出了一个巨大的挑战, 所以要尽量减小器件芯片的结温以及温度的振荡幅度。

在 110 V、60 Hz 的交变信号驱动下, 分别仿真

了平均功率为 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、1.0 W 时的瞬态特性曲线,分析这些曲线发现与上述情况大致相同,但各功率下达到稳态时器件的平均结温及振荡幅度有所变化,如图 6 所示。由图 6 可知,结温及结温振荡幅度随着输入功率的增大而线性增大,拟合所得关系分别为

$$T_j = 12.38P_e + 25.00, \quad (2)$$

$$I_{T_j} = 6.69P_e, \quad (3)$$

式中 T_j 为平均结温, P_e 为输入热平均功率, I_{T_j} 表示的是芯片温度达到稳态时的振荡幅度。

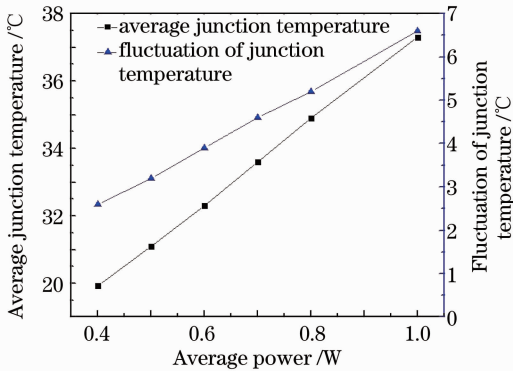


图 6 结温及振荡幅度与功率的关系

Fig. 6 Dependence of junction temperature and its fluctuation on the input power

AC-LED 不同于 DC-LED, 仅仅获得平均结温还不够, 由于它的结温不断波动, 有时最高结温比平均结温大很多, 且这个差值随着功率的升高而变大。由(2),(3)式可知当功率达到 5 W 时, 振荡幅度高达 33.43 °C, 最高结温比平均结温大 16.70 °C。因此, 仅仅测量 AC-LED 的平均结温不足以衡量它的工作状态是否正常。

在 110 V、热平均功率为 0.8 W 的交变信号驱动下, 改变输入功率的频率, 模拟仿真不同频率下的 AC-LED 瞬态特性曲线如图 7 所示。由图 7 可知, 随着频率的增大, 结温振荡幅度迅速减小, 但减小的幅度逐渐变缓, 在 50~60 Hz 频率段振荡幅度减小 1.05 °C, 这对器件设计非常重要, 器件所用材料在温度大小快速变化的环境中工作, 无论是寿命、性能以及可靠性都将受到严重的影响, 若能减小温度变化幅度将有效地保证器件正常工作; 同时, 结温随着频率的增大而降低, 但是降幅比较小。其原因是结温随着功率的变化而变化, 功率从波谷升到波峰时结温一直在增大, 如果频率增大, 功率周期时间变短, 功率很快升到波峰后开始变小, 此时结温还没有到达最大值就因为功率的变化而开始减小, 因此随着频

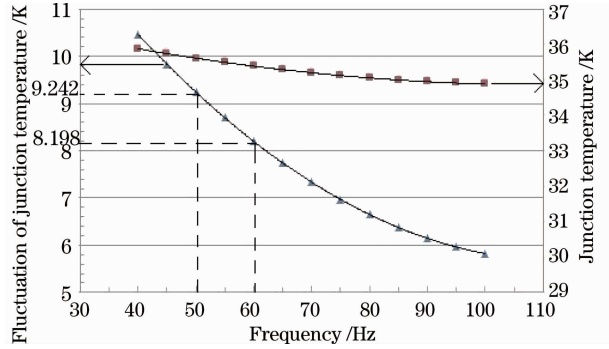


图 7 稳态时结温及振荡幅度随频率的变化曲线

Fig. 7 Dependence of junction temperature and its

fluctuation on frequency in the steady state

率的增大平均结温和结温振荡幅度都会减小。

比对功率函数与芯片结温瞬态曲线, 如图 8 所示。在每一个驱动周期内, 器件的结温随着功率的增加而增加, 当耗散功率达到最大时, 结温并未达到最大值, 而是继续增大直到功率下降到一定值。当耗散功率将为最小值时, 器件的结温仍继续降低, 直至耗散功率开始增大到一定值。在每个周期内, 结温达到最大值或最小值与输入功率的最大值或最小值之间存在一个 2.40 ms 的相位时间差。这是由于材料热容对热流存在一个时间响应, 使得结温不能对耗散功率的改变而迅速做出反映, 但是器件温升的振荡频率与输入功率的频率是相同的。

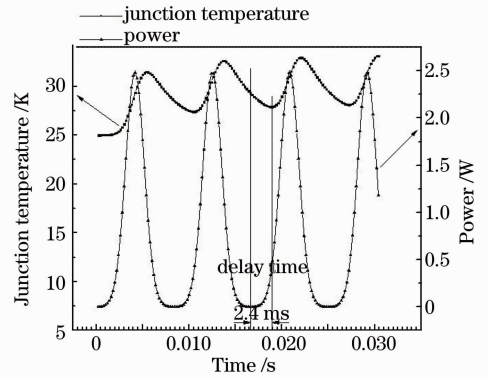


图 8 功率函数与芯片温升的相差

Fig. 8 Time delay of chip temperature and input power

5 结 论

运用 FloEFD 有限体积分软件, 对 1 W 白光 AC-LED 样品进行了模拟分析。通过模拟仿真和实际测量在直流信号驱动下的样品 AC-LED, 分别计算出各层结构的热阻, 其 PN 结到环境的热阻大小分别为 12.17 K/W 和 12.30 K/W, 偏差仅为 1.05%, 验证了模拟仿真的准确性。

通过对 AC-LED 在交变耗散功率驱动下瞬态

特性曲线的分析,发现器件的结温会随着时间按照一定频率周期性上下振荡,且振荡幅度比较大。输入功率频率不变时,平均结温和振荡幅度随着平均功率的升高而线性增大。输入平均功率不变时,随着频率的升高器件的平均结温和温度振荡幅度都呈降低趋势,频率越小降低幅度越大。最后比对了功率函数和芯片温升曲线,发现两者的频率是一样的,但是芯片温升与驱动功率存在 2.40 ms 的相位差。

本文虽然对 AC-LED 的热特性利用有限元法做了一些研究,但是实际材料参数是一个温度敏感量,其大小会随着温度的变化而变化,所以还需通过对材料结构的研究,对模型进行热学结构的优化,提高仿真的精度。

参 考 文 献

- 1 Tan Han. The lighting technology application of the semiconductor light-emitting diode(LED) [J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2010, 36: 24~25
谭 哈. 浅谈半导体发光二极管 LED 照明技术的应用[J]. 机电信息, 2010, 36: 24~25
- 2 Xiao Si, Li Lin. A designing of LED stage lighting for long distance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(s1): s100307
肖 思, 李 林. 大功率 LED 舞台灯的照明设计[J]. 光学学报, 2011, 31(s1): s100307
- 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 Cao Yujie, Jin Shangzhong, Cen Songyuan. Design for LED lamps with high color rendering Index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222002
曹宇杰, 金尚忠, 岑松原. 高显色指数 LED 灯的设计[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1222002
- 5 G. A. Onushkin, Y. J. Lee, J. J. Yang *et al.*. Efficient alternating current operated white light-emitting diode chip[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, 21(1): 33~35
- 6 H. H. Yen, W. Y. Yeh, H. C. Kuo. GaN alternating current light-emitting device[J]. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2007, 204(6): 2077~2081
- 7 J. P. Ao, Hisao Sato, Takshi Mizobuchi *et al.*. Monolithic blue LED series arrays for high-voltage AC operation[J]. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2002, 194(2): 376~379
- 8 Jachee Cho, Jaewook Jung, Jung Hye Chat *et al.*. Alternating-current light emitting diodes with a diode bridge circuitry[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, 46(48): L1194~L1196
- 9 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
- 10 Y. Q. Zong, P. T. Chou, M. T. Lin *et al.*. Practical method for measurement of ac-driven LEDs at a given junction temperature by using active heat sinks[C]. *SPIE*, 2009, 7422: 742208
- 11 F. S. Hwu, C. H. Yang, J. C. Chen. Method for measuring the mean junction temperature of alternating current light-emitting diodes[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2011, 22(4): 045701
- 12 N. Aizar Abdul Karim, P. A. Aswatha Narayana, K. N. Seetharamu. Thermal analysis of LED package [J]. *Microelectronics International*, 2006, 23(1): 19~25
- 13 J. Lalith, Y. M. Gu, N. Nadarajah. Characterization of thermal resistance coefficient of high-power LEDs[C]. Six International Conference on Solid State Lighting. New York: SPIE, 2006: 63370~63377
- 14 Lianqiao Yang, Jiazheng Hu, Lan Kim *et al.*. Variation of thermal resistance with input power in LEDs[J]. *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2006, 3(6): 2187~2190

栏目编辑: 韩 峰