

一种交流发光二极管的电路设计方法

李 浩¹ 张环月² 张竞辉¹ 曹 帆¹ 邹念育¹ 高英明¹

¹大连工业大学 光子学研究所, 辽宁 大连 116034

²大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 交流发光二极管(AC LED)电流交变的特性使其不能如直流发光二极管(DC LED)那样简单地由电功率与发光效率的乘积得到光通量。根据交流电有效电流和 LED 的光电特性引入了 AC LED 等价光效的概念,由 AC LED 的应用电路分别建立了等价光效、LED 串联颗数与 AC LED 光通量和发光效率之间的关系,分析了 AC LED 光通量与光效曲线特点。由此提出了一种按照给定光通量设计 AC LED 的方法,该方法通过 AC LED 的晶粒串联数量与等价光效得到理论光通量,实验表明理论值小于实验值,两者最大相差 15 lm。

关键词 光电子学; 交流发光二极管; 电路设计; 光通量; 发光效率

中图分类号 TN312+.8 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s114004

A Circuit Design Method for Alternating Current Light-Emitting Diode

Li Hao¹ Zhang Huanyue² Zhang Jinghui¹ Cao Fan¹ Zou Nianyu¹ Gao Yingming¹

¹Institute of Photonics, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China

²School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract Alternating current passing through alternating current light-emitting diode (AC LED) makes it not reasonable to decide luminous flux of AC LED by simply multiplying electric power and luminous efficiency. Based on alternating current effective current and light-emitting diode photoelectric characteristics, concept of AC LED equivalent luminous efficiency is introduced, and equations concerning luminous flux and luminous efficiency on equivalent luminous efficiency and the number LEDs-connected in series are established separately, then character of actual luminous flux and luminous efficiency curve are discussed. A method used to design AC LED is proposed, according to given luminous flux. Through the method theoretical AC LED luminous flux, proved less than actual value by experiment, the biggest difference is calculated.

Key words optoelectronics; alternating current light-emitting diode; circuit design; luminous flux; luminous efficiency

OCIS codes 140.3510; 230.3670; 220.2945

1 引 言

发光二极管(LED)以其固有的高效、节能、绿色环保、长寿命等优点,受到越来越多的关注^[1-3]。随着材料生长及制作技术的迅猛发展,其应用领域也越来越广,特别是近年来,已大规模地进入了普通照明的领域,而日常使用的电源是高压交流电(110 V 和 220 V),因此针对直接采用交流源驱动的 AC LED 的研究也备受瞩目。与直流(DC)LED 相比交流(AC)LED 最大的优点是无需 AC/DC 转换器,直接由交流电进行驱动,技术的关键是 LED 晶粒在封装时的特殊排列组合技术。

收稿日期: 2015-01-27; **收到修改稿日期:** 2015-02-28

基金项目: 辽宁省普通高等教育本科重点支持专业建设项目“光源与照明”([2012]108)、辽宁省普通高等教育本科教学改革立项项目“设计服务类紧缺人才培养模式创新研究与实践”(UPRP20140139)

作者简介: 李 浩(1988—),女,硕士研究生,主要从事半导体照明方面的研究。E-mail: lihao_dlpu@163.com

导师简介: 高英明(1976—),男,博士,讲师,主要从事半导体照明与智能照明方面的研究。E-mail: gyiming@dlpu.edu.cn (通信联系人)

AC LED 最早的结构是将两串 LED 正反连接,每个交流周期内两串 LED 交互导通。Jaehee Cho 等^[4]提出了惠斯通桥式电路结构,这种结构的设计使得大部分芯片都处于点亮状态,提高了芯片的辐射面积。Zong 等^[5]通过对 AC LED 热沉温度的控制和调节,同时测量相应的电流值,进而根据电流与结温以及热沉温度之间的关系达到计算 AC LED 热阻的目的,从热特性的研究角度对其芯片设计进行优化。文献^[6]对不同功率的 AC LED 的电路进行了设计与仿真,并借助软件设计了 PCB 并对电路设计进行了验证,最后得到了多种功率的 AC LED 电路设计。目前,关于 AC LED 本身的电学参数和与之相关的晶粒排列个数对其发光效率和光通量的影响研究很少。

本文建立了 AC LED 发光效率和光通量的仿真模型,得到了应用电路的电学参数、串联 LED 数量和 LED 晶粒光电转换能力与发光特性之间的关系。通过实验验证了仿真模型的合理性。最后提出了一种按照给定光通量设计 AC LED 的方法。对深入了解 AC LED 光源的发光特性,指导 AC LED 的应用设计有一定意义。

2 理论背景

2.1 工作模型

AC LED 可视为由数十颗 LED 的串联结构组成的,其典型排列结构通常有两种^[7-11]:图 1(b)的反向并联结构和图 1(c)为惠斯通桥式电路结构,这样在交流电正负半周均发光。由于桥式结构的 LED 芯片存在共用段,所以芯片的利用率比反向并联结构高,在达到相同光输出的情况下,所需 LED 芯片数量比反向并联结构的少,因此桥式结构有利于降低成本。AC LED 应用电路是由 AC LED 光源、限流电阻 R 和交流电源组成的闭合回路^[12-13],如图 1(a)所示。

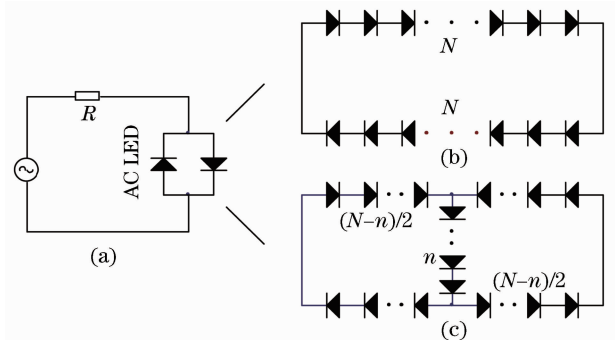


图 1 AC LED 应用电路及典型结构。(a)应用电路;

(b)反向并联结构;(c)桥式电路结构

Fig.1 Application circuit and typical structure of AC LED.

(a) Application circuit; (b) anti-parallel structure;

(c) bridge circuit structure

在 220 V/50 Hz 交流电下测得 AC LED 的端电压与限流电阻的端电压,进而得到 AC LED 的工作电流,三者之间的关系如图 2 所示。可见 AC LED 在交流电的一个周期内并不是完全被点亮的。此外,其工作电流与端电压相位相同,因此在根据其电压计算电路中的电流时可以不考虑初始相位的因素。

2.2 仿真模型

从 AC LED 的电学属性着手分析其发光特性。根据二极管的分段线性等效电路^[14]可将 LED 微晶粒等效为由理想的二极管、等效电阻和恒压源三者串联组成。LED 导通后,其导通电压 V_f 表示为:

$$V_f = r_D i + V_{on}, \quad (1)$$

式中 r_D 是 LED 导通后的电阻; i 为 LED 上的电流; V_{on} 为 LED 的开启电压。AC LED 可视为两串相同颗数的 LED 方向并联构成的,串联数量为 N ,那么 AC LED 的整体导通电压 V_{nf} 可为:

$$V_{nf} = NV_f = N(r_D i + V_{on}). \quad (2)$$

设正弦交流电为 $u(t) = U_m \sin \omega t$,其中 U_m 为交流电的最大值;周期 $T = 2\pi/\omega$ 。由 LED 的特性可知,当 $u(t)$ 大于开启电压 V_{on} 时 AC LED 才会显著发光。令 $u(t) = N \cdot V_{on}$,由图 2 的 AC LED 工作波形图的对称性

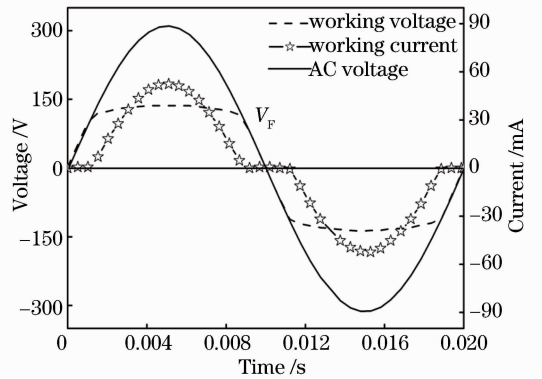


图 2 AC LED 工作电压、电流的波形图

Fig.2 Voltage and current waveform of AC LED in time domain

得到其在 $[0, T]$ 内的发光区间 T_e 为:

$$\left[\frac{T}{2\pi} \arcsin\left(\frac{NV_{on}}{U_m}\right), \frac{T}{2} - \frac{T}{2\pi} \arcsin\left(\frac{NV_{on}}{U_m}\right) \right] \cup \left[\frac{T}{2} + \frac{T}{2\pi} \arcsin\left(\frac{NV_{on}}{U_m}\right), T - \frac{T}{2\pi} \arcsin\left(\frac{NV_{on}}{U_m}\right) \right]. \quad (3)$$

由于 AC LED 端电压与工作电流同相位,那么 AC LED 的工作电流大小可以表示为:

$$i(t) = \{u(t) - N[r_D i(t) + V_{on}]\} / R, \quad (4)$$

整理得到:

$$i(t) = \frac{u(t) - NV_{on}}{R + Nr_D}, \quad (5)$$

将其代入(2)式,得到 AC LED 导通后的整体导通电压为

$$V_{nf}(t) = N[r_D i(t) + V_{on}] = N\left[r_D \frac{u(t) - NV_{on}}{R + Nr_D} + V_{on}\right]. \quad (6)$$

根据交流电电流有效值 I 的定义^[15]及交流电的对称性,可通过(5)式得到 AC LED 的电流有效值表达式:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{\frac{T}{2\pi} \arcsin \frac{NV_{on}}{U_m}}^{\frac{T}{2} - \frac{T}{2\pi} \arcsin \frac{NV_{on}}{U_m}} \left[\frac{u(t) - NV_{on}}{R + Nr_D} \right]^2 dt}. \quad (7)$$

同理,通过(6)式求得 AC LED 的整体导通电压的有效值 V_F

$$V_F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{nf}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{\frac{T}{2\pi} \arcsin \frac{NV_{on}}{U_m}}^{\frac{T}{2} - \frac{T}{2\pi} \arcsin \frac{NV_{on}}{U_m}} \left\{ N \left[r_D \frac{u(t) - NV_{on}}{R + Nr_D} + V_{on} \right] \right\}^2 dt}. \quad (8)$$

AC LED 的电功率 P 可表示为 $P = V_F \cdot I$, I 为 AC LED 工作电流有效值,与单颗 LED 的电流有效值相同。设单颗 LED 的发光效率为 $\eta_e(I)$, 物理意义是与 AC LED 电流有效值 I 对应的单颗 LED 发光效率值(如图 3 所示),简记为 η_e 。由 LED 的串联关系和发光效率的定义^[16] AC LED 的光通量可表示为

$$\Phi = V_F \cdot I \cdot \eta_e(I) = V_F \cdot I \cdot \eta_e. \quad (9)$$

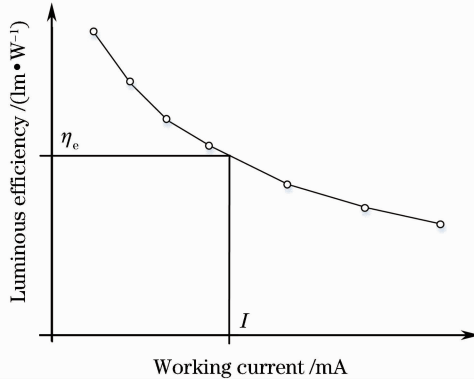


图 3 η_e 的物理意义

Fig. 3 Physical meanings of η_e

由图 1 可知,AC LED 工作时消耗的电功率是自身的功率与限流电阻功率之和,表示为 $P_T = V_F I + I^2 R$, 则 AC LED 的整体发光效率可表示为:

$$\eta_T = \frac{\Phi}{P_t} = \frac{\Phi}{V_F I + I^2 R} = \frac{V_F \eta_e}{V_F + IR}. \quad (10)$$

由于 AC LED 的工作电流是周期变化的,因此光效 η_e 也是周期变化的。与电流有效值 I 类似, η_e 实质上是光效的等价值,位于 LED 的最大光效 η_{max} 与最小光效 η_{min} 之间且随着 AC LED 串联数量 N 的变化而变化。首先把二极管看作是理论模型($r_D = 0$),并令 LED 的开启电压为 2.7 V,对理论公式(9)和(10)式仿真分析 AC LED 的光通量和整体光效曲线变化趋势。对于 220 V/50 Hz 的交流电,令 $R = 3 \text{ k}\Omega$, $\eta_{max} = 60 \text{ lm/W}$, $\eta_{min} = 20 \text{ lm/W}$,分别得到光通量、整体光效随电路串联数量 N 变化的曲线,如图 4 所示。由仿真结果得到 AC

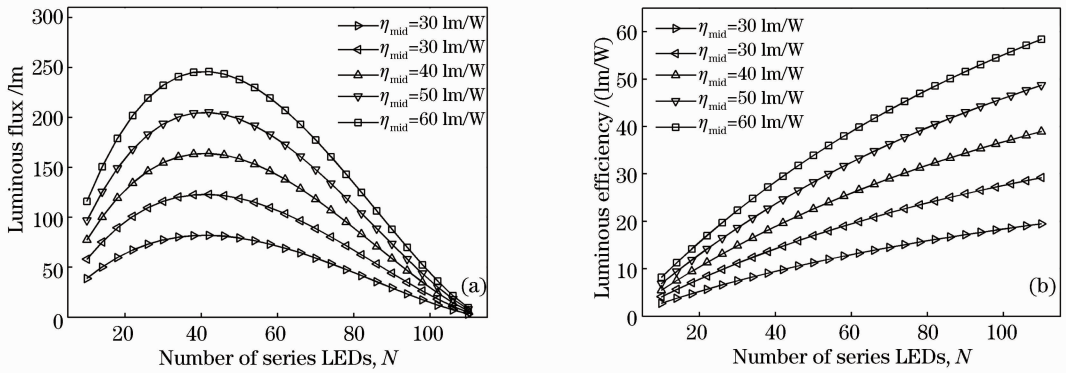


图 4 (a) AC LED 整体光通量 Φ 与串联 LED 数量 N 的关系; (b) AC LED 整体光效 η_T 与串联 LED 数量 N 的关系

Fig. 4 (a) Relationship between Φ and N ; (b) relationship between η_T and N

LED 的光通量与光效均与交流电的角频率 ω 无关,这与文献[17]测量结果一致;实际的光通量随 N 的变化曲线应位于 LED 光效最大时对应光通量曲线与光效最小时对应的光通量曲线之间,实际的光效曲线与光通量曲线类似。实际曲线与理想曲线应该具有相同的趋势, η_{max} 与 η_{min} 越接近则实际曲线越明确。实际光通量应该随着 N 先增大后减小;实际光效应该与 N 几乎呈线性关系,是 N 的单调递增函数,最大值是等价光效 η_e 。

2.3 实验验证

通过实验验证了上述理论的推断,为了避免在 LED 串联数量 N 较小时,过大的电流可能损害 LED,实验中采用了较大的限流电阻,如 $3\text{ k}\Omega$ 。实验设备包括:光谱辐射分析仪 SL-300,配备 1 m 的积分球;安捷伦 6812B 交流电源,为 AC LED 供电。实验中为了能够方便地对 AC LED 的串联数量 N 进行调整,所用的 AC LED 是由一款商品化的 LED 玉米灯改造而来的,该玉米灯将贴片封装的单颗 LED 以串联的连接方式固定在数个铝基板上(如图 5 所示)。采用桥式结构改造玉米灯获得 AC LED,所得到的 N 有 23、32、39、46、53、60、67、74、81。实验采用 $220\text{ V}/50\text{ Hz}$ 交流电,结果如图 6 所示,其中图 6(b)针对三个限流电阻分别测量了 AC LED 整体光效与 N 的关系。从图 6 中的实验结果可以看出实验结果与理论分析曲线基本一致,验证了理论分析的正确性。



图 5 实验用 LED 玉米灯

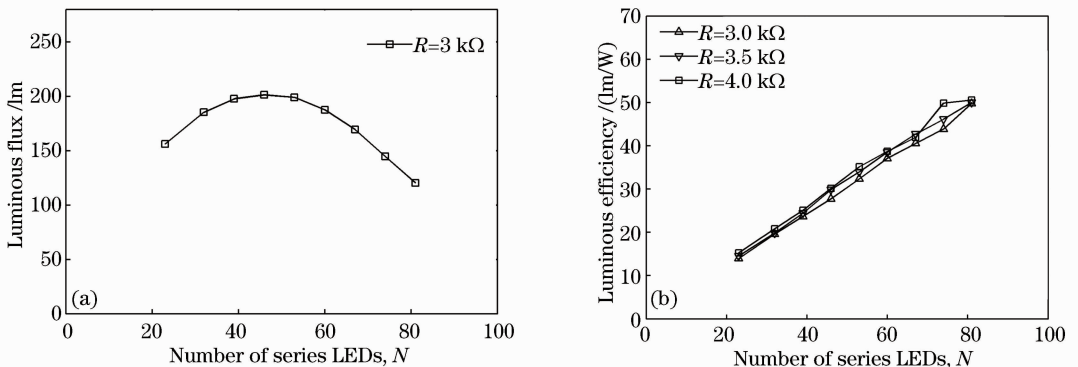


图 6 (a) AC LED 光通量与 LED 串联个数的实测关系; (b) AC LED 整体光效与串联个数的实测关系

Fig. 6 (a) Relationship between N and V_F of experiment; (b) relationship between N and V_F of experiment

3 设计方法

3.1 方法分析

根据上述理论分析与实验结果,给出按照指定光通量设计 AC LED 的方法。由(5)式可知:给定交流电 $u(t)$ 和限流电阻 R , AC LED 的光通量由 AC LED 串联数量 N 和等价光效 η_e 决定。等价光效 η_e 物理意义是与 AC LED 电流有效值 I 对应的单颗 LED 光效值。由(7)式可得到串联个数 N 与电流有效值 I 的关系,再由单颗 LED 工作电流与其发光效率的关系,得到与 AC LED 的有效工作电流值 I 对应的光效值 η_e ,把 N 与 η_e 代入(5)式算出光通量,此光通量即为设计指定的输出光通量。由 N 得到对应的 η_e 过程可由图 7 说明,其中的 LED 工作电流与光效曲线通过实验测量得到。

3.2 设计举例

为了便于比较,以实验中所用玉米灯的 LED 为例进行说明。设计过程分以下几个步骤。

- 1) 首先测量玉米灯所用 LED 的伏安特性曲线,得到 LED 的开启电压 V_{on} 为 2.8 V; LED 导通后的二极管的电阻 r_D 为 7 Ω ;
- 2) 测量得到玉米灯所用 LED 的发光效率与工作电流的关系曲线,如图 7 所示;
- 3) 根据(7)式得到 AC LED 串联个数 N 与有效电流 I 的关系, I 随着 N 增大而减小,两者几乎呈线性关系,如图 8 所示;
- 4) 按照图 6 的方法,确定 AC LED 串联数量 N 与等价光效 η_e 的对应关系,代入(9)式计算光通量;
- 5) 根据步骤 4) 的计算结果绘制光通量与 AC LED 的串联数量的 N 关系曲线,通过该曲线由做图法找到与指定光通量对应的串联个数 N 。

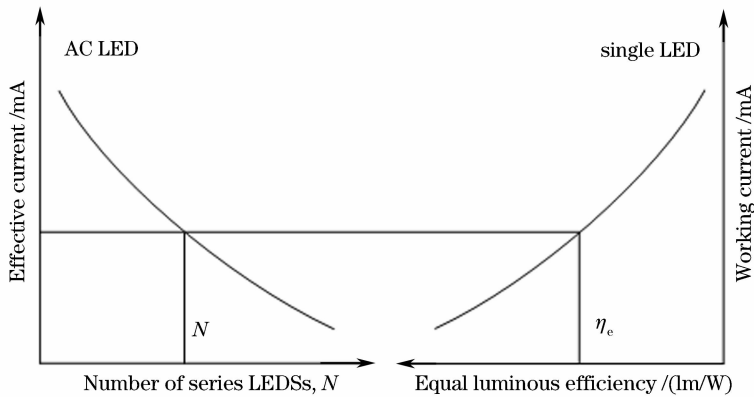


图 7 确定 LED 发光效率的过程说明图

Fig. 7 Processing illustration of obtaining LED luminous efficiency

根据上述方法,由已知的 LED 的开启电压,等效电阻得到不同串联个数对应的有效电流后,确定等价光

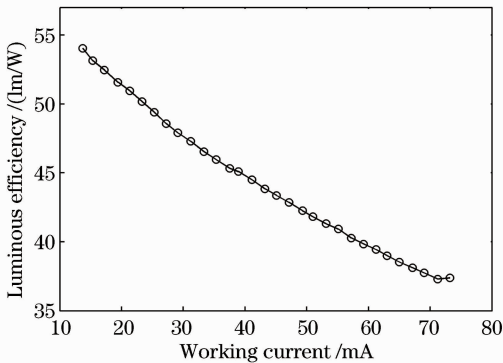


图 8 LED 发光效率与工作电流的关系

Fig. 8 Relationship between LED luminous efficiency and working current

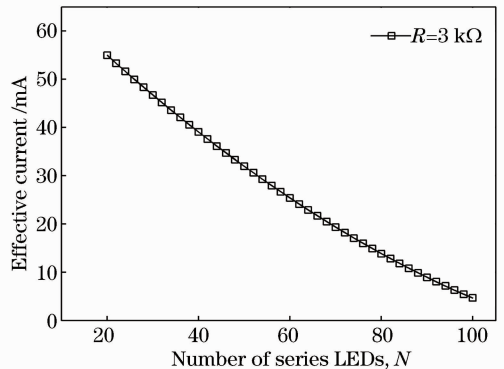


图 9 AC LED 电流有效值与串联个数 N 关系

Fig. 9 Relationship between effective current and N

效 η_e , 最后将其代入由(9)和(10)式分别得到理论光通量与理论光效, 将它们与实际光通量和实际光效进行比较, 如表 1 所示。从中可以看出理论光通量和理论的光效均是略低于实际的光通量和实际的光效的, 这是由于在理论分析中采用的是二极管的这线性等效电路模型, 这致使 LED 有部分导通而没被考虑进去, 因而理论的值会低于实际测量值。以上结果说明该方法能够较好的反应 AC LED 的串联颗数、LED 的光电特性与 AC LED 光通量和光效之间的联系, 进而确定指定光通量的 LED 的串联个数, 为 AC LED 的设计提供参考。

表 1 设计值与实际值对照表

Table 1 Contrast table between theory and actual value

N	I / mA	V_F / V	$\eta_e / (\text{lm/W})$	Φ_T / lm	Φ_F / lm	$\eta_T / (\text{lm/W})$	$\eta_F / (\text{lm/W})$
23	52.4	65.7	41.3	142.9	156.3	12.23	13.93
32	45.1	87.5	43.4	171.4	185.4	17.04	19.60
39	39.8	102.9	44.8	183.5	197.7	20.45	23.66
46	34.7	116.9	46.3	187.9	201.3	25.50	27.74
53	29.9	129.5	47.8	184.2	199.2	30.24	32.34
60	25.3	140.5	49.4	175.9	187.6	34.05	37.08
67	21.1	149.7	51.0	160.8	169.5	37.86	40.55
74	17.1	157.0	52.5	140.6	144.75	41.60	43.86
81	13.3	162.1	54.5	117.5	120.5	45.73	49.79

4 结 论

无论何种结构的 AC LED 就其交流驱动的方式而言均可看作是由两串具有相同数量 LED 反向并联构成的。由于 AC LED 的电流是交变的, 其 LED 的发光效率也是交变的, 使得 AC LED 不能像 DC LED 那样简单地通过电功率与光效的乘积得到光通量。通过引入 AC LED 等价光效的概念, 建立了串联数量、等价光效与 AC LED 光通量和光效的关系式。通过理论分析得到 AC LED 的光通量与交流电的角频率无关, 随着串联数量 N 的增大而先增大后减小; AC LED 的整体发光效率是串联数量 N 的单调递增函数, 且与 N 几乎呈线性关系。由此提出了一种按照给定光通量设计 AC LED 的方法, 该方法利用单颗 LED 的光电参数, 结合 AC LED 的串联数量得到理论光通量。实验表明理论值与实际值较为一致, 该方法能够按照给定光通量要求设计 AC LED。

参 考 文 献

- 1 Wu Haibin, Wang Changling, He Sumei, *et al.*. Research of color rendering of white LED based on red and green phosphors[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1777-1782.
- 2 吴海彬, 王昌铃, 何素梅, 等. 绿荧光粉的白光 LED 显色性研究[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1777-1782.
- 3 Xiao Si, Li Lin. A designing of LED stage lighting for long distance[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100307.
- 4 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.
- 5 Fei Xiang, Qian Keyuan, Luo Yi, *et al.*. Junction temperature measurement and luminous properties research of high-power LED[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2008, 19(3): 289-292.
- 6 费 翔, 钱可元, 罗 毅, 等. 大功率 LED 结温测量及发光特性的研究[J]. 光电子•激光, 2008, 19(3): 289-292.
- 7 Jaehee Cho, Jaewook Jung, Jung Hye Chat, *et al.*. Alternating current light emitting diodes with a diode bridge circuitry[J]. Japanese J Appl Phys, 2007, 46(12L): L1194-L1196.
- 8 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(8): 742208.
- 9 Wu Limin. The LED Lighting Technology Driven Directly By Alternating Current [D]. Xi an: Xidian University, 2012: 15-42.
- 10 吴丽敏. AC 直接驱动 LED 光源技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 15-42.
- 11 H H Yen, W Y Yeh, H C Kuo, *et al.*. GaN alternating current light emitting device[J]. Physical Status Solid (A), 2007, 204(6): 2077-2081.
- 12 F S Hwu, G J Sheu, M T Lin, *et al.*. Method for determining the junction temperature of alternating current light-emitting diodes[J]. The Institution of Engineering and Technology, 2009, 3(2): 159-164.
- 13 Man Rui, Li Qiujun. Current research and development of AC LED[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(7): 1068-1070.
- 14 满 瑞, 李秋俊. AC LED 的研究现状与发展[J]. 电源技术, 2012, 36(7): 1068-1070.
- 15 Shin M W, Jang S H. Thermal analysis of high power LED packages under the alternating current operation[J]. Solid-State Electron, 2012,

68: 48–50.

- 11 J P Ao, Hisao Sato, Takashi Mizobuchi, *et al.*. Monolithic blue LED series arrays for high-voltage AC operation[J]. *Physica Status Solid (A)*, 2002, 194(2): 376–379
- 12 Grigory A, Onushkin, Young-Jin Lee, *et al.*. Efficient alternating current operated white light-emitting diode chip [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2009, 21(1): 33–35.
- 13 Gao Yingming, Zou Nianyu, Zhang Huanyue, *et al.*. Research on operational factors of AC LED [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 32(10): 606–609.
高英明, 邹念育, 张环月, 等. 交流发光二极管工作特性的研究[J]. *半导体光电*, 2010, 32(10): 606–609.
- 14 Robert L Boylestad, Louis Nashelsky. *Electronic Devices and Curcuit Theory*[M]. Li Lihua, Li Yong Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2008: 20–32.
罗伯特, 路易斯. 模拟电子技术[M]. 李立华, 李永华译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 20–32.
- 15 Qiu Guanyuan. *Theory of Circuitry (4th Edition)* [M]. Beijing: Academic Press, 2009: 132–135.
邱关源. 电路(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 132–135.
- 16 Hao Yunxiang, Chen Xiaju, Zhang Baozhou. *Photometry*[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010: 30–40.
郝允祥, 陈遐举, 张保洲. 光度学[M]. 北京: 中国计量出版社, 2010: 30–40.
- 17 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.

栏目编辑: 刘丰瑞