

基于脉冲式 U-I 特性的高功率型 LED 热学特性测试

王 昕¹, 许英杰¹, 范贤光¹, 王海涛¹, 吴景林¹, 左 勇²

- (1. 厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005;
2. 北京长城计量测试技术研究所 国防科技工业第一计量测试研究中心, 北京 100095)

摘 要: 热学特性是影响功率型 LED 光学和电学特性的主要因素之一, 设计了一套基于脉冲式 U-I 特性的功率型 LED 热学特性测试系统, 可以测试在不同结温下 LED 工作电流与正向电压的关系, 从而获得 LED 的热学特性参数。该系统通过产生窄脉冲电流来驱动 LED, 对其峰值时的电压电流进行采样, 同时控制和采集 LED 的热沉温度, 从而获得不同温度下 LED 的 U-I 特性曲线。与其他 U-I 测试系统相比, 文中采用了窄脉冲(1 μ s)工作电流, LED 器件 PN 结区处于发热与散热的交替过程, 不会造成大的热积累, 大大提高了测量精度。实验中, 对某功率型 LED 进行了测试, 获得了该器件的电压、电流和结温特性曲线, 并利用 B 样条建立该器件的 U-I-T 模型, 进而实现了对其结温的实时在线检测。

关键词: 脉冲注入式; U-I 特性; 高功率型 LED; 热学特性测试; B 样条

中图分类号: TN312.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2417-06

Thermal performance testing for high power light-emitting diode based on voltage-current characteristics with pulse injection

Wang Xin¹, Xu Yingjie¹, Fan Xianguang¹, Wang Haitao¹, Wu Jinglin¹, Zuo Yong²

- (1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
2. The 1st Metrology & Measurement Research Center of National Defense Science Industry of China, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Thermal performance is one of the main factors which affect the optical and electrical performance of high power LED. The thermal performance testing system for high power LEDs based on voltage-current characteristics with pulse injection was designed in this paper, which can test the relationship between the operating current and forward voltage of LED under different junction temperatures, thereby obtaining LED thermal characteristics parameters. The system worked by generating a controlled narrow pulse current to drive the LED, and sampling the peaks of voltage and current of LEDs with LED heat sink temperature control and acquisition, thereby obtaining the voltage-current characteristic curve in different junction temperatures. Compared with other voltage-current testing systems, the designed system adapts the narrow pulse duty cycle (1 μ s), so the PN junction of LED devices is always in the process of alternately heating and cooling, which can avoid large heat

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(61102030)

作者简介: 王昕(1984-), 男, 助理教授, 博士, 主要从事信号分析与处理方面的研究。Email: xinwang@xmu.edu.cn

通讯作者: 范贤光(1980-), 男, 副教授, 主要从事 LED 器件制作和检测方面的研究。Email: fanxg@xmu.edu.cn

accumulation and greatly improve the accuracy of measurement. In the experiment, a power LED device was tested by the system and the voltage-current-temperature curve was obtained. Then the B-spline based U-I-T model of the LED was established, so the real-time online detection of LED device was achieved.

Key words: pulse injection; U-I characteristics; high power LED; thermal performance testing; B-spline

0 引言

随着半导体照明产业的高速发展,功率型 LED 获得了广泛的推广和应用^[1-3]。由于当前的材料、封装和工艺等技术水平所限,功率型 LED 的散热问题突出,其热学特性严重影响了 LED 的性能(包括光度、色度和电气参数等),也是决定了 LED 光电特性和寿命的重要参数。如何准确测试热阻以及由之进行合理的散热设计是提高 LED 整体性能的关键因素,也是 LED 器件封装工艺和应用设计须首要解决的核心问题。

由于电子和计算机技术的发展及各种测量方法的改进,LED 器件特性参数的测量准确度达到了很高的水平。但伴随着器件的不断改进和发展,对其特性测量的要求越来越严格,精度也要求越来越高。目前可以通过红外热像仪法^[4]、显微拉曼光谱法^[5]、电学参数法^[6-7]等不同的方法测试器件的热学特性。其中电学测试方法具有简单,快速非侵入式等优点,而被广泛应用于 LED 热特性的测量。

传统的电学法测试中,为了减小测试电流产生自热效应,测试电流应尽可能小,然而过小的测试电流会影响到测试信号的信噪比。而且,实际上任何数量级的测试电流都将产生热效应,引入测量误差。为了解决该问题,改用脉冲电流(窄脉冲和小占空比的脉冲)注入测试,此时 LED 器件 PN 结区处于发热与散热的交替过程,不会造成大的热积累或大的温升,极大提高测量的精度,该方法被称为脉冲测量法。SEKELY^[8]最早提出了用瞬态的方法获得微秒级下器件的响应参数,以推导出器件内部的热导特性和结构;Zong^[9]进一步提出了脉冲法,可以实现对 LED 热阻较精确的测量和分析。温怀疆等^[10]也利用脉冲测量法进行了热阻热容的研究。脉冲测量法具有诸多优点,然而由于窄脉冲电源和相应的高速同步采

样及配套的温度控制的实验设备不易研制和无处采购,目前国内使用这种方法进行测试的实例较少,且无法进行更深入研究。基于此,文中研制了一套基于脉冲式 U-I 特性的功率型 LED 热学特性测试系统,并开展了相应的实验研究。

1 测试原理

在一定的工作电流和温度的范围内,LED 的 PN 结正向压降 V_F 与工作电流 I_F 和结温 T 存在如下函数关系^[10]:

$$V_F = V_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_F} \right) T - \frac{kT}{q} \ln T \quad (1)$$

式中: q 为电子电荷; k 为玻耳兹曼常数; C 是与 PN 结面积、掺杂浓度等有关的常数; r 在一定范围内也是常数; $V_{g(0)}$ 为绝对零度时 PN 结材料的导带底与价带顶的电势差,对于相同材料的 PN 结, $V_{g(0)}$ 为定值。

在实际的工作中,LED 的结温 T 通常无法直接测量,由公式(1)可知,可以通过测量正向压降 V_F 与工作电流 I_F 来间接地测量 LED 的结温。然而,LED 的结温 T 、正向压降 V_F 与工作电流 I_F 三者的关系较为复杂,且存在一定的非线性度,因此需要通过实验获得它们之间的对应关系,进而利用一定的算法对其进行建模。

2 系统设计与实验

2.1 系统设计

图 1 给出了在预先设定的脉冲占空比和步幅的电流注入下,功率型 LED 两端电压、输出光脉冲和结温变化时序图,为了准确获得单脉冲注入下的电流和电压值,还需要专门的取样脉冲信号,用于控制脉冲电流和电压的同步取样。从图 1 中可以看出,电流脉冲宽度越窄,脉冲间隔时间越长,LED 结温热积

累越小。

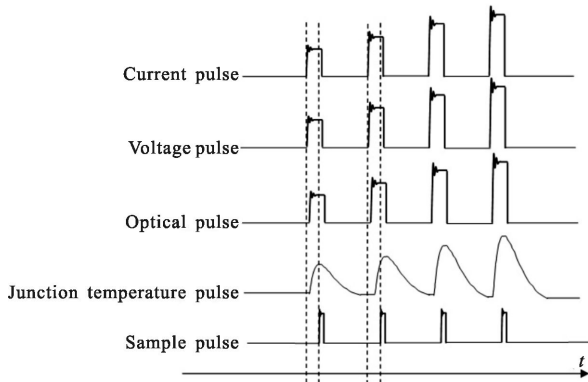


图 1 脉冲注入法 LED 热学特性测试基本时序图

Fig.1 Sequence chart of the thermal performance testing with pulse injection

整个系统的设计方案原理图如图 2 所示,测试系统由计算机及测量软件、数字控制模块、脉冲驱动电流模块和温度控制模块组成。数字控制模块采用高性能 ARM 处理器 STM32F407 和 FPGA 器件 EPIC3T144 主从双 CPU 结构,ARM 完成整个测试系统的核心处理任务(参数设置和分配、信号预处理、与计算机通讯等任务),FPGA 完成脉冲宽度和周期可调的方波开关信号产生、串行 AD 和 DA 的时

序发生电路等;脉冲驱动电流模块包含恒流源和脉冲调制接口,恒流源采用 MOSFET 管 2SK1259 实现电压到电流的转换,脉冲调制接口采用开关管 2SJ128 实现,最终获得脉冲宽度、周期和幅度可调的脉冲电流;温度控制模块由温度执行器件 TEC 和热敏电阻闭环负反馈控制系统,采用 PI 控制策略,TEC 驱动采用对管 2SJ1259 和 2SJ200 实现的电压到电流的转换,由双向变化的电流驱动 TEC。其工作原理可以由以下几个方面分别说明:

(1) 将被测 LED 放于可控恒温测试夹具中,系统既可以设置和保持 LED 热沉的温度,使其在某特定温度下工作,也可以通过紧贴的温度传感器读取任意时刻 LED 的结温。

(2) 由数字控制模块控制峰值大小可调的恒定电流、主从控制 FPGA 产生脉冲宽度和占空比可调的窄脉冲信号。脉冲信号和电流经过调制电路耦合后产生脉冲电流来驱动 LED。

(3) 高速采样电路可以实时读取任意电流下 LED 两端的正向电压和驱动电流,同时对电流进行校正。

(4) 整个系统通过 USB 接口由计算机的测量软件进行控制和数据采集。

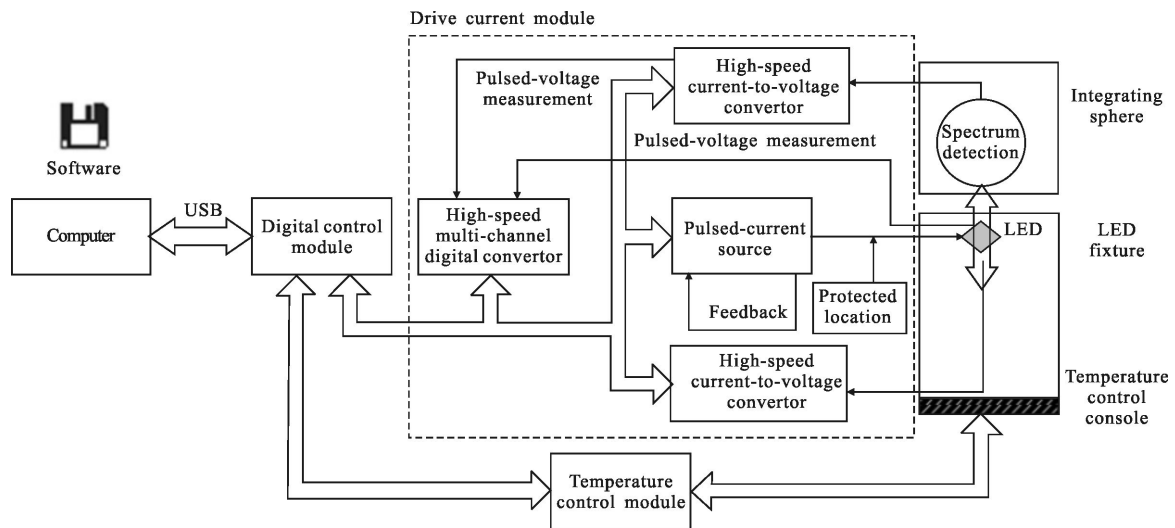


图 2 脉冲注入式功率型 LED 热学特性测试系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of the thermal performance testing system for high power LED with pulse injection

整个系统设计的关键主要有两个:一是能产生脉冲宽度足够窄且峰值恒定的驱动电流,这也是该系统控制 LED 器件自热的重要手段;二是温度的设置和控制精度。该系统的脉冲电流源模块对脉冲电流的输出宽度可以稳定地控制在 $1 \mu s$,从而控制 LED

器件的发热时间。而该系统的温控模块,同时采用了恒温箱和热沉双级温度控制,借助负反馈控制,对 LED 器件结温的控制和采样精度可以达到 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 实验

在实验中,利用所研制的系统测试了某功率型

LED 器件的脉冲 U-I 特性曲线。将该 LED 器件放置于夹具中,并与热沉贴紧。首先调节恒温箱的温度使 LED 的环境温度稳定在 295 K,然后利用计算机软件对 LED 的结温进行进一步精确控制,最终使得 LED 的结温稳定在 295 K。此时,产生脉冲电流(波形如图 1 所示)驱动 LED,并使得电流峰值在 0.02~0.5 A 范围内,以 0.02 A 为步长逐渐增大。在温度与驱动电流均恒定的条件下,测试此时 LED 的端电压。最后,分别在 320 K、340 K、360 K、380 K 和 400 K 的结温下,测试 LED 的 U-I 特性,画出其 U-I 特性曲线图,如图 3 所示。从图 3 中可看出:

(1) 在结温不变的条件下,LED 器件的 U-I 特性具有一定的非线性,且非线性度随着驱动电流的增加逐渐降低;

(2) 在驱动电流不变的条件下,随着 LED 结温的升高,电压随之降低。结温若等间隔升高,则电压降低的幅度将越来越小,即结温和电压之间同样具有一定的非线性度。

在图 3 所示的测试数据基础上,可以利用一定算法对该 LED 器件的电流-电压-结温特性进行建模。通过建模,可以计算得到 LED 器件当前的结温,从而获得 LED 器件的热学特性表征。

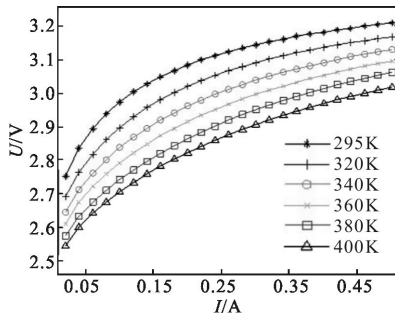


图 3 某功率型 LED 在不同结温下的 U-I 特性测试曲线
Fig.3 U-I testing curves of the high power LED in different junction temperatures

3 功率型 LED 的电压-电流-结温建模

3.1 基于 B 样条的电压-电流-结温建模方法

功率型 LED 器件的电压-电流-结温之间是一个两输入单输出的模型(电流和电压为输入,结温为输出),该模型的建立本质上是一个连续的曲面拟合。因此文中采用 B 样条的方法对其进行建模。B 样条具有低阶光滑的特性,被广泛的应用在自由曲线

曲面的造型中。

给定一组两输入单输出样本数据 $\{(U_{\alpha}, I_{\beta}, T_{\alpha, \beta})\}_{\alpha=1, \beta=1}^{n, m}$, 其中,输入序列 $\{(U_{\alpha})\}_{\alpha=1}^n$ 和 $\{(I_{\beta})\}_{\beta=1}^m$ 分别表示电压和电流,是 $[U_{\min}, U_{\max}]$ 和 $[I_{\min}, I_{\max}]$ 区间内的单调递增数列;输出序列 $\{(T_{\alpha, \beta})\}_{\alpha=1, \beta=1}^{n, m}$ 表示 LED 的结温。

首先,在电压和电流两个方向给出单调非减的节点序列:

$$\begin{cases} t_{1, -k+1} \leq \dots \leq t_{1, 0} < t_{1, 1} < \dots < t_{1, L} < t_{1, L+1} \leq \dots \leq t_{1, L+k} \\ t_{2, -k+1} \leq \dots \leq t_{2, 0} < t_{2, 1} < \dots < t_{2, M} < t_{2, M+1} \leq \dots \leq t_{2, M+k} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\{t_{1, u}\}_{u=0}^{L+1}, \{t_{2, v}\}_{v=0}^{M+1}$ 为内节点,取值范围与输入序列相同,而其他节点则称为外节点。节点(尤其是内节点)的数量和分布将直接影响 B 样条曲线曲面的拟合精度。这里,假设外节点为等差数列,且公差等于该方向上输入序列的取值范围(如 U 方向上,外节点序列的公差为 $U_{\max} - U_{\min}$)。k 为 B 样条的阶数(次数为 k-1)。在实际应用中,一般采用 4 阶(3 次, k=4) B 样条。

对 B 样条基函数的定义有很多种,其中应用最为广泛的是 deBoor 和 cox 提出的递推定义:

$$\begin{cases} B_{u, t_1}^1(U_{\alpha}) = \begin{cases} 1, & t_{1, u} < U_{\alpha} \leq t_{1, u+1} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \\ B_{u, t_1}^k(U_{\alpha}) = \frac{U_{\alpha} - t_{1, u}}{t_{1, u+k-1} - t_{1, u}} B_{u, t_1}^{k-1}(U_{\alpha}) + \frac{t_{1, u+k} - U_{\alpha}}{t_{1, u+k} - t_{1, u+1}} B_{u+1, t_1}^{k-1}(U_{\alpha}) \end{cases} \quad (3)$$

在电流方向上的 B 样条基函数同样可以用公式(3)算出。因此, B 样条可以表示为:

$$S(U_{\alpha}, I_{\beta}) = \sum_{u=-k+1}^L \sum_{v=-k+1}^M [h_{u, v} B_{u, t_1}^k(U_{\alpha}) B_{v, t_2}^k(I_{\beta})] \quad (4)$$

式中: $h_{u, v}$ 为 B 样条的控制系数; S 为两输入单输出的 B 样条函数,用于表示结温。

为求解该 B 样条的控制系数,将图 4 中的实验样本数据带入公式(4),可以得到一个多元方程组。一般地,样本数据的个数应大于 B 样条控制系数的个数,即 $nm \geq (L+k) \times (M+k)$,从而使得该方程组为超定方程组,可由最小二乘法求解。

最小二乘法方法是最小均方准则下的最优方法,原理是寻找一个最优控制系数使得公式(5)中的偏差最小:

$$\delta = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^m [T_{\alpha, \beta} - S(U_{\alpha}, I_{\beta})]^2 = \min \quad (5)$$

当公式(4)为超定方程组时,矩阵 D 是列满秩

的,存在唯一的最小二乘解:

$$H_{op} = \text{pinv}(B) * G \quad (6)$$

式中: B 为 $(n \times m) \times [(L+k) \times (M+k)]$ 的矩阵,其元素来自于 B 样条基函数,由公式(3)计算; $\text{pinv}(B)$ 是矩阵 B 的伪逆阵; G 为 $(n \times m) \times 1$ 维列向量,其元素为样本数据的输出 $\{(T_{\alpha,\beta})\}_{\alpha=1,\beta=1}^n \circ$

因此, B 样条模型的建立过程,包括如下步骤:

(1) 利用图 2 所示的设备获得样本数据 $\{(U_{\alpha}, I_{\beta}, T_{\alpha,\beta})\}_{\alpha=1,\beta=1}^n \circ$, 并根据样本数据中,电压电流的输入范围确定电压和电流输入的节点向量;

(2) 利用样本数据中的输入变量 $\{(U_{\alpha}, I_{\beta})\}_{\alpha=1,\beta=1}^n \circ$ 和步骤(1)中确定的节点序列,计算各个样本数据对应的 B 样条基函数的值;

(3) 将步骤(2)中的 B 样条基函数的值组成基函数矩阵 B , 其维数为 $(n \times m) \times [(L+k) \times (M+k)]$;

(4) 从样本数据中提取输出变量结温 $\{(T_{\alpha,\beta})\}_{\alpha=1,\beta=1}^n \circ$, 将其组成结温向量 G , 其维数为 $(n \times m) \times 1$;

(5) 利用最小二乘计算控制向量矩阵 $H_{op} = \text{pinv}(B) * G$, 其矩阵元素即为控制系数 $h_{u,v}$;

(6) 获得 LED 器件电压-电流-结温的 B 样条模型:

$$S(U_{\alpha}, I_{\beta}) = \sum_{i=-k+1}^L \sum_{j=-k+1}^M [h_{u,v} B_{u,i}^k(U_{\alpha}) B_{v,j}^k(I_{\beta})]$$

在 LED 器件工作时,只要测得当前的工作电压和电流,即可利用所建立的模型,计算出该器件当前的结温,方便对该器件进行实时结温检测。另外,利用该模型,可以获得该 LED 器件在一定范围内,任意电压和电流条件下的结温,以此来整体分析该器件的结温特性,以便对其散热结构进行改进。

3.2 实验结果

利用上节所述的 B 样条建模方法,将图 3 所示的实验数据作为样本数据,建立该 LED 器件的电压-电流-结温 B 样条模型。在两个输入方向,即电压和电流方向分别采用 5 个和 10 个内节点,4 阶 B 样条函数。图 4 为利用该模型所获得的 LED 器件的 $U-I-T$ 特性曲面。利用该模型,重新计算图 3 中实验点所对应的结温,其最大相对误差为 0.42%,最大绝对误差为 1.5 K。

为进一步说明该模型的准确性,在图 3 的实验点之外,随机选取了 6 个点作为测试点,如表 1 所

示。从表 1 中可看出,对于随机选取的,样本数据之外的测试数据, B 样条模型也能获得较高的估计精度,对结温的最大估计误差为 0.54 K,能够满足实际检测的需求。利用该数学模型,只要已知某时刻 LED 的电压和电流,即可估计此时的 LED 结温。

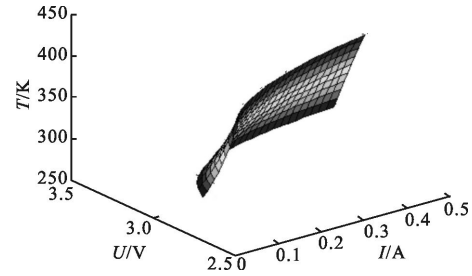


图 4 B 样条模型拟合的某功率型 LED 器件 $U-I-T$ 特性曲面
Fig.4 $U-I-T$ surface of the high power LED device fitted by B -spline model

表 1 测试数据和 B 样条模型的估计误差

Tab.1 Test data and estimated error of the B -spline model

Voltage/V	Current/A	Temperature /K	Model output/K	Error/K
2.917 09	0.07	295	295.16	0.16
3.045 47	0.23	320	319.77	0.23
3.018 38	0.27	340	340.54	0.54
3.092 21	0.49	360	360.51	0.51
2.831 65	0.17	380	380.38	0.38
2.913 09	0.31	400	399.86	0.14

4 结 论

文中研制了一套基于脉冲式 $U-I$ 特性的功率型 LED 热学特性测试系统,实现了对功率型 LED 的结温和 $U-I$ 特性曲线的测试。该系统采用了模块化的设计,对功率型 LED 的结温采用了两级控制,结温的控制和采样精度达到 0.5°C ;采用了脉冲式电流驱动 LED 器件工作,能够将脉冲宽度控制在 $1 \mu\text{s}$,使得 LED 始终处于发热与散热交替的状态,且发热时间较短,在很大的程度上减少了 LED 的自热效应,从而提高了测试精度。在实验中,对某功率型 LED 器件进行的测试,获得了在不同结温下的 $U-I$ 特性曲线。利用所测得的实验数据,建立了该 LED 器件

的 U-I-T 数学模型, 可用于实时检测该 LED 器件的结温。因此, 该系统可以实现对 LED 器件实时准确的检测, 具有较大的应用价值。

参考文献:

- [1] Kwag D S, So S H, Baek S M. Study on thermal and structural stability of high power light-emitting diode lighting system [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, 14(5): 3564-3568.
- [2] Jeong T, Park H J, Ju J W, et al. High efficiency in GaN blue light-emitting diode with >4-W output power at 3 A [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(7): 649-652.
- [3] Wang Hong, Zhang Xiaofan, Du Naifeng, et al. Reflector design method of integrated high-power LED light source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1282-1286. (in Chinese)
王洪, 张小凡, 杜乃峰, 等. 面向大功率 LED 集成光源的反射器设计方法 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1282-1286.
- [4] Zhai Xuhua, Zhang Hongtao, Yi Fuchang, et al. Refractive/diffractive optical design of a long-focal-length uncooled LWIR thermal imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 32(5): 847-849. (in Chinese)
翟旭华, 张洪涛, 尹福昌, 等. 长焦距非制冷长波红外热像仪折射/衍射光学设计 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 32(5): 847-849.
- [5] Xi Y, Xi J Q, Gessmann T, et al. Junction and carrier temperature measurements in deep-ultraviolet light-emitting diodes using three different methods [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(3): 031907.1-031907.3.
- [6] Kirkus L, Kalceff W, Mccredie G. System for measuring the junction temperature of a light emitting diode immersed in liquid nitrogen [J]. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77(4): 046107-046110.
- [7] Xi Y, Schubert E F. Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method [J]. *Appl Phys Letter*, 2004, 85(12): 2163-2165.
- [8] Sékely V, Bien T V. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method [J]. *Solid State Electron*, 1988, 31(9): 1363-1368.
- [9] Zong Y Q, Ohno Y S. New practical method for measurement of high-power LEDs [C]//CIE Expert Symposium on Advances in Photometry and Colorimetry, 2008: 102-106.
- [10] Wen Huaijiang, Mou Tongsheng. The measurement of LED junction temperature and thermal capacity using pulse current [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(7): 53-59. (in Chinese)
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.