

文章编号: 1000-7032(2016)01-0124-06

电-热应力对 GaN 基白光 LED 可靠性的影响

邹水平, 吴柏禧, 万珍平*, 唐洪亮, 汤 勇

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 研究了电流和温度应力因子及其共同作用时对 GaN 基白光 LED 可靠性的影响, 并从 LED 结构方面探究了各应力下 LED 的失效机理。结果表明, 以电流作为加速应力时, 荧光粉退化为其主要的失效方式, 同时 LED 出光的相关色温上升, 红色比减少; 在热应力下, 主要是 LED 芯片结构发生变化, 峰值波长蓝移, 光通量衰减, 同时支架出现老化现象。电流和温度应力共同作用时, 温度应力对 LED 光通量的影响大于电流应力。电-热应力下的光通量衰减大于电、热应力单独作用时的衰减之和, 即电-热应力作用时, 光衰不具有线性叠加性。

关键词: LED; 电流应力; 温度应力; 可靠性; 失效分析

中图分类号: TN306 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20163701.0124

Effect of Current-temperature Stress on The Reliability of GaN LED

ZOU Shui-ping, WU Bo-xi, WAN Zhen-ping*, TANG Hong-liang, TANG Yong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhwan@scut.edu.cn

Abstract: The effects of current-temperature stress on the reliability of LED were investigated, and the failure mechanism was analyzed from the structure of LED. It is found that the current and temperature have different influences on the reliability of LED. When LEDs are applied current accelerating stress, the degradation of phosphor is the main failure mode which can cause the increasing of correlated color temperature and decreasing of red ratio. When LEDs are applied temperature accelerating stress, the structure of chip would change, which leads to the blueshift of peak wavelength. In addition, the structure of housing also appears aging at high temperature. The temperature stress has greater effect on the reliability than current stress when the current stress and temperature stress are applied together. The attenuation of luminous flux under current-temperature stress is greater than the sum of current and temperature stress working alone, which namely implies that the current and temperature stress do not have the features of linear superposition.

Key words: LED; current stress; temperature stress; reliability; failure analysis

1 引 言

作为新一代的固态光源, LED 具有体积小^[1]、寿命长^[2]、成本低^[2]、功耗小^[3]和绿色环

保^[1,4]等优点。作为各国重点扶持的新兴产业, LED 的发展非常迅速, 已广泛应用于运输照明、背光源、显示和普通照明等领域^[5]。高可靠性是 LED 广泛应用的基础, 加强对 LED 可靠性的研究

收稿日期: 2015-10-08; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金委-广东省联合基金重点项目(U1401249)资助

并加以提高具有重要的实际意义。

电流和温度应力是影响 LED 可靠性的重要因素。陈建新等^[6]研究了电流应力对大功率白光 LED 可靠性的影响,发现结温和荧光粉失效是主要因素。李艳菲等^[7]对比了以电流作为加速应力的老化实验前后 LED 的电学、光通量和光谱特性,并分析了芯片和荧光粉的失效机理。赵阿玲等^[8]通过对 LED 进行电流应力加速寿命,分析得出光衰和荧光粉、封装材料退化和散热等有关。

Chen 等^[9]和 Wang 等^[10]研究了结温对 LED 可靠性的影响,结果显示随着温度的升高,其正向电压减少而峰值波长增加,但他们未对其光谱成分的变化进行研究。Hu 等^[11-13]从芯片和封装过程角度分析了 LED 发光衰减的原因。郭伟玲等^[14]通过测试 LED 在高温和低温下的光电特性,发现温度对正向电压、光强和波长等有较大影响。周舟等^[15]通过研究发现,在 LED 高温老化过程中,芯片和封装材料的老化共同导致 LED 缓慢失效。赵紫薇等^[16]认为大功率 LED 的热管理重点是如何降低 PN 结的结温,从源头上提高芯片出光。以上对温度应力的研究主要集中在电参数的变化和对封装结构的影响,对 LED 发射光谱的研究较少。

综上所述,虽然许多学者对电流、温度应力对 LED 可靠性的影响做了大量的研究,但对于电流和温度应力如何影响 LED 的可靠性及其对 LED 造成何种影响并不明确。一般认为芯片和封装材料老化共同导致 LED 失效,实际上,LED 在电流应力作用下和温度应力作用下的失效机理并不相同。可见,对电流和温度应力影响 GaN 基白光 LED 可靠性的研究尚不够深入。

本文以电流、温度作为加速应力进行加速寿命实验,以光通量、峰值波长和红色比等光电参数为基础分别研究电流应力和温度应力对 GaN 基白光 LED 寿命的影响,分析各应力下影响 LED 可靠性的主要因素,得到各应力下的失效机理。通过研究电-热应力共同作用时 LED 光电参数的变化,得到电流-温度应力共同作用下的 LED 光通量衰减规律。

2 实 验

样品为自制的同批次的合格 LED 灯珠。LED 封装采用 A31U-CD 芯片、KER-3000-M2 硅胶和 2571 型封装胶,荧光粉为 GM537D 黄色和

RH630G 红色荧光粉。每组实验的 LED 灯珠数量为 10 只,以减少实验偶然性误差。实验采用单应力实验方法,即实验中除某一应力大小不同外,其他条件保持相同。

在实验过程中,LED 的驱动采用恒流驱动。在数据采集方面采用定时截尾方式,即每隔 7 d 测量加速寿命实验中的 LED 相关光电参数。在测定时,先将 LED 断电放置于常温环境下 2 h 左右,待其完全冷却至室温后,采用 PMS-80 紫外-可见-近红外光谱分析系统在 LED 额定工作电流下进行光电参数的测量。在数据处理上先剔除 10 个测量值中的粗大误差,然后将剩下的数据的平均值作为该组实验的实验数据。

3 结果与讨论

3.1 电流应力实验

电流应力实验是以电流为变化的加速因子。将实验样品安置于串联的老化板上,并给老化板通入设定的稳定电流,持续点亮 LED,每间隔一周测量 LED 的光电参数。以初始的光电参数作为初始值,某时刻测量的光电参数除以初始值作为其相应参数的维持率。实验在恒温环境(25 °C)中进行。由于本实验环境恒温,且通入的稳定电流较小,引起的 LED 结温变化幅度不大^[17],所以主要考虑电流应力对 LED 寿命的影响。

电流应力实验分别设置了 30(额定值),60,100 mA 3 个实验参数。在常温 25 °C 时,不同电流下的光通量维持率和老化时间之间的关系如图 1 所示。随着 LED 工作时间的增加,其输出光通量逐渐衰减,且电流越大,衰减越迅速。在 30 mA 和 60 mA 电流下,在老化约 2 800 h 之前,光通量

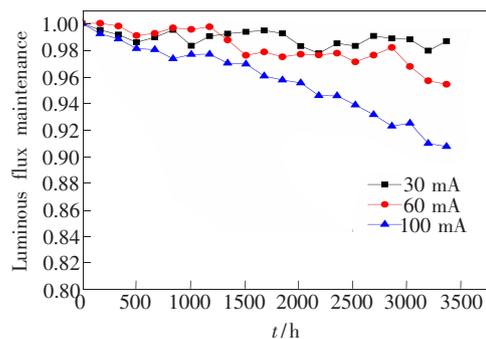


图 1 常温下不同电流下的光通量维持率

Fig. 1 Luminous flux maintenance under different currents at room temperature

的衰减相差很小;之后,随着老化时间的增加,60 mA 电流下的光通量衰减逐渐增大。而在 100 mA 电流下,光通量衰减从实验开始,就比 30 mA 和 60 mA 光通量衰减大,随着老化时间的延长,其差距逐渐增大。

为探究在电流应力下 LED 的失效机理,我们首先对在 30,60,100 mA 工作电流下的 LED 芯片出光的峰值波长(蓝光波长)进行归一化处理,发现 3 个电流下的峰值波长都没有出现较大的偏移,如图 2 所示,可见,芯片结构未出现较大改变。

图 3 为 100 mA 恒定电流下的 LED 两端正向电压的变化图。随着老化时间的延长,LED 的正向电压略有上升,上升幅度约为 1.3%。芯片内部都存在缺陷、位错,随着 LED 老化时间的延长,缺陷、位错密度增大,导致芯片结构内部的串联电阻增大,正向电压增加。

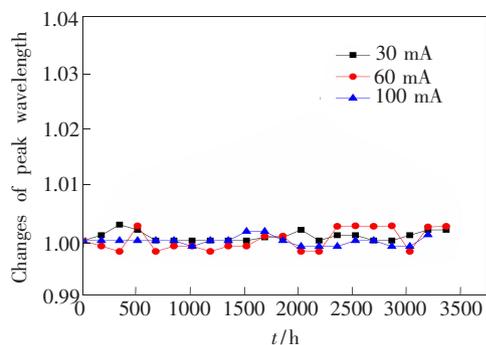


图 2 LED 峰值波长随老化时间的变化

Fig. 2 Changes of peak wavelength with aging time

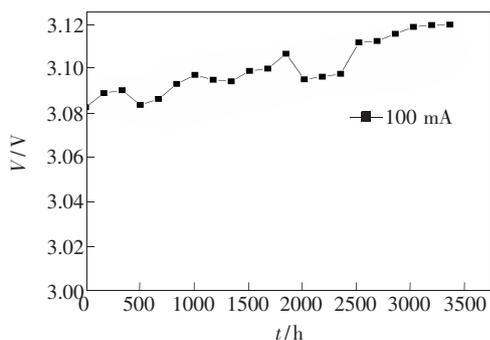


图 3 LED 正向电压随老化时间的变化

Fig. 3 Changes of LED forward voltage with aging time

LED 出光的相关色温(CCT)变化如图 4 所示。随着老化时间的延长,LED 灯珠的相关色温呈现逐步上升的趋势。其中在 100 mA 电流下,相关色温的变化率为 1.75%。这说明在 LED 出光中,蓝光相对于黄光的比例在逐步增加,颜色逐

渐由暖色光向偏冷色光转变。

红色比是红色光谱在整个发射的可见光谱中所占的百分比。我们将各电流下 LED 光谱中的红色比参数做归一化处理,如图 5 所示。在不同工作电流下的发射光谱中,红色比都随老化时间的延长呈下降趋势,且电流越大则红光衰减越大。

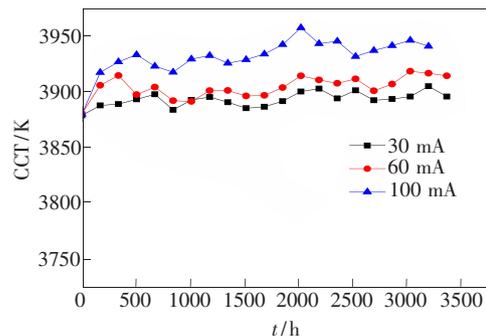


图 4 LED 相关色温随老化时间的变化

Fig. 4 Changes of CCT with aging time

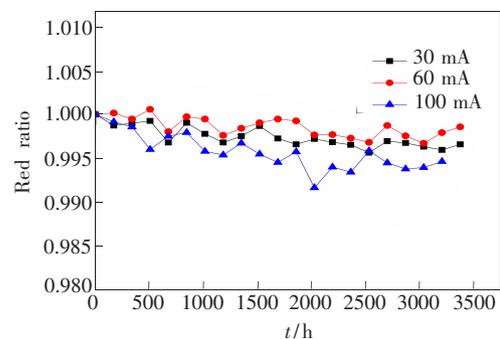


图 5 不同电流下红色比随老化时间的变化

Fig. 5 Changes of red ratio with aging time

LED 峰值波长和正向电压的变化情况说明芯片结构未发生显著改变。LED 相关色温的上升和红色比的下降表明,LED 的衰减主要是荧光粉退化、激发效率降低所致。

在电流加速老化实验过程中,LED 芯片会产生大量的热量。若不能有效散热,会导致 LED 的芯片和封装胶的温度上升,散布在封装胶内的荧光粉会出现一定程度的退化,使荧光粉的转化效率降低。荧光粉的退化,使被激发的黄光偏少,导致在光谱上显示为红、黄等光的比例较蓝光减少,色坐标偏移,如图 6 所示。

电流应力寿命实验结果表明,电流应力对 LED 的可靠性有重要影响,荧光粉退化为其主要的失效方式,表现为 LED 出光的相关色温上升,光谱中的红色比减少。

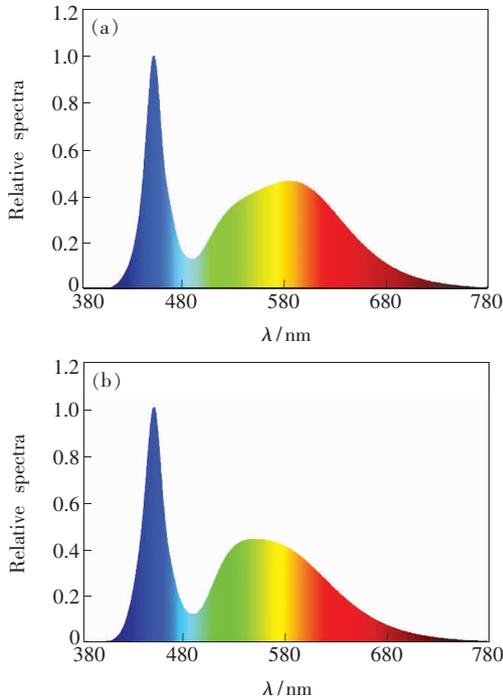


图 6 老化实验前(a)、后(b)的 LED 光谱。

Fig. 6 LED spectra before (a) and after (b) aging

3.2 温度应力实验

温度是影响 LED 可靠性的重要因素, 结温是最真实的 LED 温度反映指标。结温和外界温度存在以下关系:

$$T_J = T_A + P_{th} \cdot R_{th}, \quad (1)$$

其中 T_J 为结温, T_A 为 LED 环境温度或者管壳温度, P_{th} 为 LED 的热耗散功率, R_{th} 为芯片到管壳的热阻。从式(1)可以看出结温的测定比较复杂。由于实验采用同批次 LED, 为简化实验程序, 本文直接以环境(烤炉)温度作为温度应力大小研究温度应力对 LED 可靠性的影响。本实验研究在额定 30 mA 电流下, 不同的环境温度应力(常温

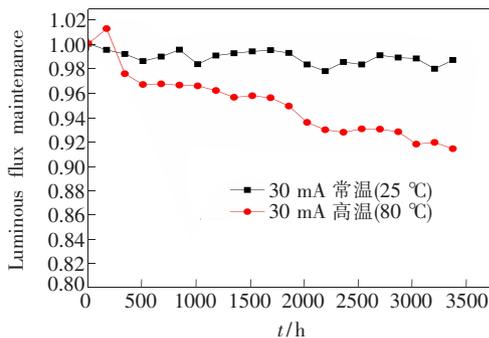


图 7 不同温度下的 LED 光通量维持率

Fig. 7 Luminous flux maintenance of LED under different temperature

25 °C 和高温 80 °C) 对其可靠性的影响, 图 7 所示为 LED 光通量在归一化后不同温度下光通量的维持情况。

从图 7 可见, 温度对 LED 的光通量有很大影响。LED 光通量在常温和高温下的衰减速率不同, 在高温时的衰减较常温迅速。在常温时, LED 正常工作 3 400 h 后的光通量仍维持在 98% 左右, 而在高温下则衰减至最初的 90% 左右。

图 7 为 LED 出光的峰值波长的变化情况。在常温下, LED 出光的峰值波长几乎未改变; 而在高温状态下, 峰值波长明显蓝移。LED 峰值波长出现蓝移是由于芯片多量子阱区的强烈极化效应, 即 LED 芯片结构发生了改变, 稳定性能降低。

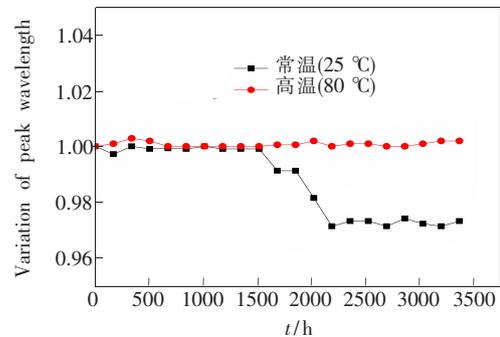


图 8 LED 峰值波长的变化情况

Fig. 8 Variation of peak wavelength under different temperature

从图 8 还可以看出, 在实验初期, 高温和常温下 LED 的峰值波长相同, 说明 LED 芯片结构未出现改变。经过 1 500 h 老化后, 高温下的峰值波长减小, 芯片结构开始发生改变。但是老化到 2 200 h 左右时, 其峰值波长几乎不再发生变化。芯片的结构并不随着工作时间的延长而一直缓慢改变, 而是在某时刻芯片内部的缺陷、位错等积累到一定程度, 才开始出现峰值波长的改变。蓝移到一定程度后, 峰值波长会一直保持稳定。

常温和高温下 LED 出光中红色比的变化如图 9 所示。随着 LED 工作时间的延长, LED 出光的红色比例略有下降, 而且 80 °C 高温和常温下的红色比下降速率相当, 实验前后的红色比的变化仅在 0.5% 左右, 可见温度应力对荧光粉的退化影响较小。

LED 支架有承载 LED 芯片、散热和出光的作用。LED 支架一般为塑料制品, 因此在使用中容易出现老化。图 10 是温度应力实验后的 LED 支架杯壁老化图。

温度应力实验结果表明, 温度主要对材料为

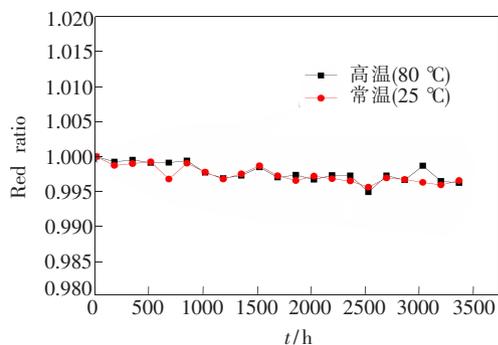


图 9 温度对 LED 出光中红色比的影响

Fig. 9 Effect of temperature on red ratio of LED spectrum

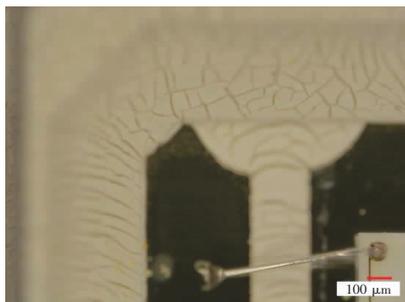


图 10 LED 支架塑料老化图

Fig. 10 Photo of plastic aging of LED stents

半导体的芯片有影响,而对荧光粉的性能影响较小。温度加速了芯片内部缺陷、位错的扩张速率,导致白光 LED 峰值波长蓝移。而荧光粉在 80 °C 条件下工作 3 500 h 后,其性能几乎未发生改变。

3.3 电流-温度综合应力实验

为研究电流-温度应力共同作用对 LED 可靠性的影响,我们对不同电流(30 mA、60 mA)和环境温度(常温 25 °C、80 °C)下的 LED 光通量的衰减进行了研究,结果如图 11 所示。在实验初期,常温下 30 mA、60 mA 工作电流下的光通量衰减速率几乎相同;在工作 2 800 h 以后,不同工作电流下的光通量衰减速率才开始出现差异,且差异逐渐增大。而在高温下,30 mA、60 mA 电流下的光通量衰减明显,差异较大。

在常温下工作 3 500 h 后,30 mA 和 60 mA 电流下的 LED 光通量的维持率都较高,30 mA 维持

在 98% 以上,60 mA 维持率在 96% 左右。而在高温下工作相同时间后,LED 的光通量衰减明显,30 mA 维持率在 92% 左右,60 mA 则只维持在 86% 左右。

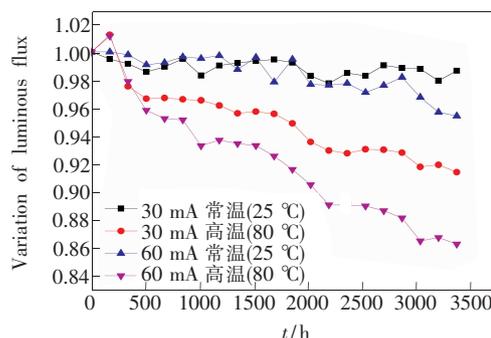


图 11 电流-温度应力对 LED 光通量的影响

Fig. 11 Variation of luminous flux under joint action of current and temperature stresses

进一步分析可知,80 °C 温度比 60 mA 电流更能加速 LED 光通量的衰减。同时,LED 光通量在高温、60 mA 电流下的衰减大于常温、60 mA 电流和高温、30 mA 电流下的衰减之和,说明电流-温度应力下的光通量衰减大于电流和温度应力单独作用时的衰减之和,即电流和温度应力作用不具有线性叠加性。

4 结 论

通过对 LED 样品分别进行电流、温度和电流-温度应力加速实验,研究了各应力对 LED 可靠性的影响。结果表明,电流应力主要是通过影响荧光粉的转化效率来降低 LED 可靠性。荧光粉退化、转化效率降低,导致被激发的黄光减少,LED 相关色温上升,出光中的红色比减少。温度应力主要通过影响 LED 芯片来降低其可靠性。温度加速了芯片内部缺陷、位错的扩张速率,导致 LED 光谱蓝移。温度还加速了支架的老化,影响 LED 出光结构的正常工作。80 °C 温度比 60 mA 电流更能加速 LED 光通量的衰减,同时电-热应力下的光通量衰减大于电流和温度应力单独作用时的衰减之和,即电流和温度应力作用不具有线性叠加性。

参 考 文 献:

- [1] 李亮,金尚忠,岑松原,等. 荧光粉浓度和电流强度对白光 LED 特性的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3):156-161
LI L, JIN S Z, CEN S Y, *et al.*. Influence of phosphor concentration and current intensity on phosphor-based white LED characteristics [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2012, 49(3):156-161. (in Chinese)
- [2] OTT M. Capabilities and reliability of LEDs and laser diodes [R]. Washington: NASA Goddard Space Flight

- Center, 1997.
- [3] 白一鸣, 罗毅, 韩彦军, 等. 集成封装发光二极管光提取效率的计算及优化 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1129-1137.
BAI Y M, LUO Y, HAN Y J, *et al.*. Calculation and optimization of light extraction efficiency for integrated LED [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1129-1137. (in Chinese)
- [4] 杨少华, 吴福根, 张春华. 白光 LED 的失效机理分析 [J]. 半导体光电, 2009, 29(6):857-859.
YANG S H, WU F G, ZHANG C H. Analysis of failure mechanisms of white LEDs [J]. *Semicond. Optoelectron.*, 2009, 29(6):857-859. (in Chinese)
- [5] CHANG M H, DAS D, VARDE P V, *et al.*. Light emitting diodes reliability review [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2012, 52(5):762-782.
- [6] 陈建新, 贺卫利, 郭伟玲, 等. 大功率白光 LED 电流应力可靠性测试 [J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(3): 297-300.
CHEN J X, HE W L, GUO W L, *et al.*. Electric current stress reliability test of high-power white LED [J]. *J. Beijing Univ. Technol.*, 2009, 35(3):297-300. (in Chinese)
- [7] 李艳菲, 张方辉, 邱西振, 等. GaN 基 LED 电流加速失效机理分析 [J]. 功能材料, 2012, 43(24):3452-3455.
LI Y F, ZHANG F H, QIU X Z, *et al.*. Study on the fabrication and thermal performance of aluminum substrate for high power LED [J]. *J. Funct. Mater.*, 2012, 43(24):3452-3455. (in Chinese)
- [8] 赵阿玲, 尚守锦, 陈建新. 大功率白光 LED 寿命试验及失效分析 [J]. 照明工程学报, 2010, 21(1):48-52.
ZHAO A L, SHANG S J, CHEN J X. Life test and failure mechanism analyses for high-power white LED [J]. *Chin. Illum. Eng. J.*, 2010, 21(1):48-52. (in Chinese)
- [9] CHEN Z Z, LIU P, QI S L, *et al.*. Junction temperature and reliability of high-power flip-chip light emitting diodes [J]. *Mat. Sci. Semicond. Proc.*, 2007, 10(4-5):206-210.
- [10] WANG J C, FANG C H, WU Y F, *et al.*. The effect of junction temperature on the optoelectrical properties of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes [J]. *J. Lumin.*, 2012, 132(2):429-433.
- [11] HU J, YANG L, WHAN S M. Electrical, optical and thermal degradation of high power GaN/InGaN light-emitting diodes [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, 41(3):1-5.
- [12] HU J, YANG L, WHAN S M. Mechanism and thermal effect of delamination in light-emitting diode packages [J]. *Microelectron. J.*, 2007, 38(2):157-163.
- [13] HU J, YANG L, HWANG W J, *et al.*. Thermal and mechanical analysis of delamination in GaN-based light-emitting diode packages [J]. *J. Cryst. Growth*, 2006, 288(1):157-161.
- [14] GUO W L, JIA X J, YIN F, *et al.*. The characteristics of high power LED at Low and high temperature [J]. *J. Semicond.*, 2011, 32(4):044007-1-3.
- [15] 周舟, 冯士维, 张光沉, 等. GaN 基大功率白光 LED 的高温老化特性 [J]. 发光学报, 2011, 32(10):1046-1050.
ZHOU Z, FENG S W, ZHANG G C, *et al.*. The aging characteristics of high-power GaN-based white light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(10):1046-1050. (in Chinese)
- [16] 赵紫薇, 纪献兵, 徐进良, 等. 大功率 LED 的寿命与散热技术的研究进展 [J]. 微电子学, 2013, 43(2):257-262.
ZHAO Z W, JI X B, XU J L, *et al.*. Research progress of lifetime and heat transfer techniques for high-power LED [J]. *Microelectronics*, 2013, 43(2):257-262. (in Chinese)
- [17] 李艳菲, 张方辉, 张静. 大功率 LED 的电流老化特性分析 [J]. 发光学报, 2012, 33(11):1236-1240.
LI Y F, ZHANG F H, ZHANG J. The accelerated aging characterization of high power LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(11):1236-1240. (in Chinese)



邹水平 (1991 -), 男, 广东龙川人, 硕士研究生, 2014 年于华南理工大学获得学士学位, 主要从事现代制造技术和 LED 的封装与可靠性方面的研究。
E-mail: 1404345050@qq.com



万珍平 (1971 -), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士生导师, 2003 年于华南理工大学获得博士学位, 主要从事现代制造技术和 LED 的封装与可靠性方面的研究。
E-mail: zhpwan@scut.edu.cn