

# 电流和温度应力对 LED 球泡灯可靠性的影响

蓝栩砚, 杨欣, 宿世臣, 章勇\*

华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广东 广州 510631

**摘要** 通过研究电流和温度应力及二者共同作用对发光二极管(LED)球泡灯可靠性的影响,分析各应力下 LED 球泡灯的失效机理。结果表明:在室温情况下,以电流为加速应力时,主要失效方式为蓝光芯片的退化;随电流应力的增大,荧光粉退化逐渐变为主要的失效方式,LED 球泡灯的相关色温上升,显示指数增大。在温度应力或电流-温度联合应力作用下,荧光粉退化严重,出现黑化现象。此外,灯具、驱动电源、LED 支架和铝基板等都发生黄化和变黑现象。这表明温度应力比电流应力更能加速 LED 球泡灯失效。基于外推法对电流应力下 LED 球泡灯的寿命进行了预测。

**关键词** 光学器件; LED 球泡灯; 电流; 温度; 加速应力; 可靠性

中图分类号 TP802+.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.082301

## Effects of Current and Temperature Stress on Reliability of LED Bulbs

Lan Xuyan, Yang Xin, Su Shichen, Zhang Yong\*

*Institute of Optoelectronic Materials and Technology, South China Normal University,  
Guangzhou, Guangdong 510631, China*

**Abstract** The effects of current, temperature or their joint stress on the reliability of LED bulbs are studied and the failure mechanism of LED bulbs under each stress is investigated as well. It is found that the degradation of blue chips is the main failure mechanism of LED bulbs at room temperature when the current is as the accelerated stress. With the increase of current stress, the degeneration of phosphor gradually becomes the main failure mechanism, which resulted in the increases of both the correlated color temperature and the color rendering index of LED bulbs. Under the temperature stress or the joint current-temperature stress, the degeneration of phosphor is serious and the phenomenon of blackening appears. In addition, the yellowing and blackening occur in the lamps, driving power sources, LED brackets and aluminum substrates. It is indicated that the temperature stress accelerates the failure of LED bulbs more than the current stress. Finally, the lifetime of LED bulbs under the current stress is predicted by the extrapolation method.

**Key words** optical devices; LED bulbs; current; temperature; accelerating stress; reliability

**OCIS codes** 230.3670; 120.6810; 220.4840

## 1 引言

作为新一代固态照明光源,白光发光二极管(LED)具有寿命长、成本低、功耗小和绿色环保等优点,已经广泛应用于室内照明、景观照明、道路照明以及商用照明等方面,其发光效率可达  $150 \text{ lm} \cdot \text{W}$ ,寿命超过 10 万  $\text{h}^{[1]}$ ,白光 LED 根据照

明用途不同而采用不同的灯具结构,从而影响 LED 灯的寿命。

LED 灯具由 LED 光源、散热结构、驱动电源、光学元件以及部分机械部件等构成,LED 灯的整体寿命除了与 LED 光源的寿命有关外,还与驱动电源和散热结构有关<sup>[2]</sup>。特别在大工作电流下和散热不良的环境下容易导致芯片结温过高和荧光粉胶体老

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2018-09-28; 录用日期: 2018-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(61377065)、广东省科技计划项目(2013CB040402009,2014B090915004,2015B010132009)、广州市科技计划项目(2014J4100056)

\* E-mail: zycq@senu.edu.cn

化等问题,所以加大工作环境温度范围可以提供与温度相关的散热不足等条件的加速应力,改变器件工作电流可以提供电流损伤或电流高负荷等的加速应力。基于电流-温度共同应力对 LED 芯片及其灯具的可靠性研究具有重要的实际意义<sup>[3]</sup>。邹水平等<sup>[4]</sup>研究了电流和温度对 LED 可靠性的影响,发现电流应力主要影响荧光粉的转化效率,温度应力主要影响 LED 芯片的可靠性。王健等<sup>[5]</sup>的研究表明温度和电流均会导致白光 LED 发光效率降低,但并没有对 LED 进行老化可靠性研究。肖承地等<sup>[6]</sup>单纯从数学统计的角度建立了多应力模型寿命计算的表达式和退化机理一致性检验的计算表达式。Wagner 等<sup>[7]</sup>研究了 LED 在温度和电流加速应力下老化 14000 h 后光通量的变化,采用外推法预测光谱变化及其老化特征。对电流拥挤效应下的 GaN 芯片进行了详细的研究分析,结果发现大电流会带来严重的封装老化,产生拓展性的缺陷<sup>[8-9]</sup>。钱敏华等<sup>[10]</sup>通过大量理论计算得出了 LED 的输出光通量、输入电功率、结温和寿命之间的内在关系,由此找到最好的 LED 工作点。杨少华等<sup>[11]</sup>则从 LED 芯片封装结构上分析得出欧姆接触退化电极键合不良、热阻过大、封装材料的膨胀系数不匹配和静电损伤等是导致 LED 器件失效的主要原因。Chan 等<sup>[12]</sup>以 IES LM80-08 标准老化 6000 h,并通过模拟计算电流应力和 LED 结温的关系,提出电流和环境温度双应力的老化加速模型的想法。LED 普遍照明灯具的有效寿命定义为在特定条件下,光通量衰减至原始值的 70% 时的工作时间( $L_{70}$ )<sup>[13]</sup>。在加速寿命实验中,根据不同应力条件下加速应力与 LED 器件的寿命关系,用对应的加速应力数学模型进行寿命评估预测。常见的加速应力数学模型有阿仑尼斯模型、对数正态模型、威布尔分布模型、逆幂律模型和艾伦模型<sup>[14-15]</sup>。

综上所述,探究 LED 的失效模式与失效机理要综合考虑 LED 芯片结构、封装材料、封装结构、散热设计等多个方面。电流和温度是影响 LED 可靠性的主要因素,由于电流损伤、高结温、散热不良、荧光粉胶体老化等是导致 LED 失效的主要原因<sup>[16-19]</sup>。但大多数研究都针对 LED 光源部分进行可靠性分析,并且基本上采用电流单应力或者温度单应力的可靠性分析方法,很少针对 LED 球泡灯或其他类型 LED 灯具进行可靠性分析。

本文主要研究了电流和温度应力及二者共同作用时对 LED 球泡灯可靠性的影响,分析各应力下

LED 球泡灯的光通量、色坐标、色温、显色指数、发射光谱及灯具结构的变化,并讨论相关失效机理。在电流单应力加速下,失效方式主要表现为蓝光芯片的退化;随电流应力的增大,荧光粉退化逐渐变为主要的失效方式,由于高电流产生高强度蓝光,激发荧光粉和高电流驱动时灯具散热不足导致 LED 光源温度过高等因素造成了荧光粉的失效严重。温度应力或电流-温度联合应力作用下,LED 球泡灯整体失效严重,荧光胶体出现严重黑化现象,此外,灯具、驱动电源、LED 支架和铝基板等都出现黄化和变黑。对比电流、温度以及电流-温度联合应力等应力加速老化,结果显示:电流应力对 LED 球泡灯的失效影响适中,选用电流单应力老化数据并采用外推法来预测 LED 球泡灯的寿命。

## 2 实验

选取市场上某品牌的同批次白光 LED,采用“6 串联 5 并联”连接方式构成 LED 球泡灯的光源模组(如图 1 所示),白光 LED 由蓝光芯片激发 YAG:Ce 黄光荧光粉形成白光。设计了 4 种驱动电流的同款散热器的 LED 球泡灯,每组灯具为 10 个,正常工作电流大小为 250 mA,加速电流大小分别为 300, 350, 450 mA,平均每颗白光 LED 芯片工作电流分别为 50, 60, 70, 90 mA。通过内置驱动电源改变调节工作电流大小,可代表球泡灯本身的工作电流,并非外界强加电流应力。再将每种电流大小的灯具平均分为两组,一组在室温下老化,另一组灯具放入 55 °C 的高温老化箱中加速老化。将记录的时间频率固定,使用积分球测量每一个球泡灯的光通量、色坐标、色温、显色指数和光谱等光电性能。老化实验结束后,拆解相应 LED 球泡灯,进行红外热分布测试,以及老化前后单个白光 LED 的伏安特性(V-I)测试。

## 3 结果与讨论

首先研究电流单应力对 LED 球泡灯可靠性的影响,老化时间持续 9000 h,工作电流为 300, 350, 450 mA 的 LED 灯具,当光通量衰减至原始光通量的 70% 时,进行 55 °C 高温和温度-电流双应力的老化实验。该实验可加快得到长寿命灯具的衰减规律,提高了对 LED 灯具的研究效率。

### 3.1 电流单应力实验

在电流单应力老化实验条件下,从图 2 可知,LED 球泡灯的光通量在前 200 h 内的变化趋势类

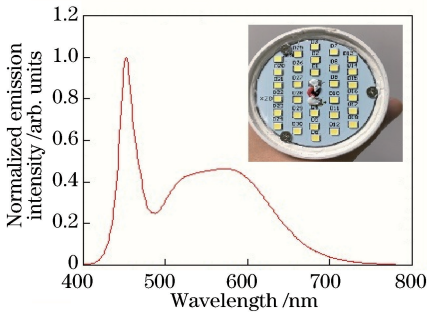


图1 LED球泡灯的发射光谱及其LED光源模组

Fig. 1 Emission spectrum of LED bulbs and photograph of LED light source module

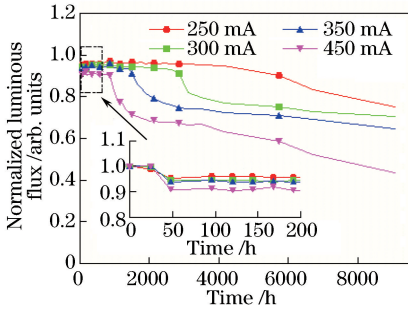


图2 室温下不同电流驱动LED球泡灯光通量维持率

Fig. 2 Luminous flux maintenance of LED bulbs under different currents at room temperature

似,在50 h时出现5%~10%的衰减,然后趋于稳定工作;当电流应力增大时,球泡灯光通量衰减变快,对于电流应力为250,300,350 mA时,球泡灯的光

通量衰减为5%,电流应力为450 mA时球泡灯的光通量衰减增大到10%。6720 h后,正常工作电流250 mA驱动下的球泡灯表现得十分稳定,仅衰减至83.41%;工作电流为300,350,450 mA的灯具光通量分别衰减至73.04%,68.96%,52.21%。

LED球泡灯的色坐标、色温和显色指数等特性随老化时间的变化如图3(a)~(c)所示,工作电流为250,300,350 mA的LED球泡灯的色坐标( $x$ ,  $y$ )值基本保持不变,并且色温在6500~6750 K范围保持稳定,显色指数较稳定;但电流为450 mA老化的LED球泡灯则在3600 h左右出现色坐标迅速下降同时色温迅速上升的现象,色温从起始值6496 K上升至8801 K,整体出光往冷色调偏移。从图3(d)的荧光粉与蓝光发射强度的比值  $R$  ( $R = I_Y/I_B$ )可以明显看出,在250,300,350 mA三种电流老化下荧光粉与蓝光发射强度之比呈现出逐渐上升的趋势,且驱动电流越大上升越快,说明电流应力老化过程中蓝光芯片退化比荧光粉衰减更厉害,球泡灯的主要失效方式为蓝光芯片的退化;而在大电流450 mA应力老化下,荧光粉与蓝光发射强度之比呈急剧下降的趋势,说明荧光粉的衰减比蓝光芯片更严重。由于大电流驱动LED球泡灯光源模组时产生大量的热量,灯具散热能力不足以支撑450 mA大电流工作的散热要求,导致结温和灯具温度同时升高;加上大电流情况下蓝光芯片光通量增大,导致

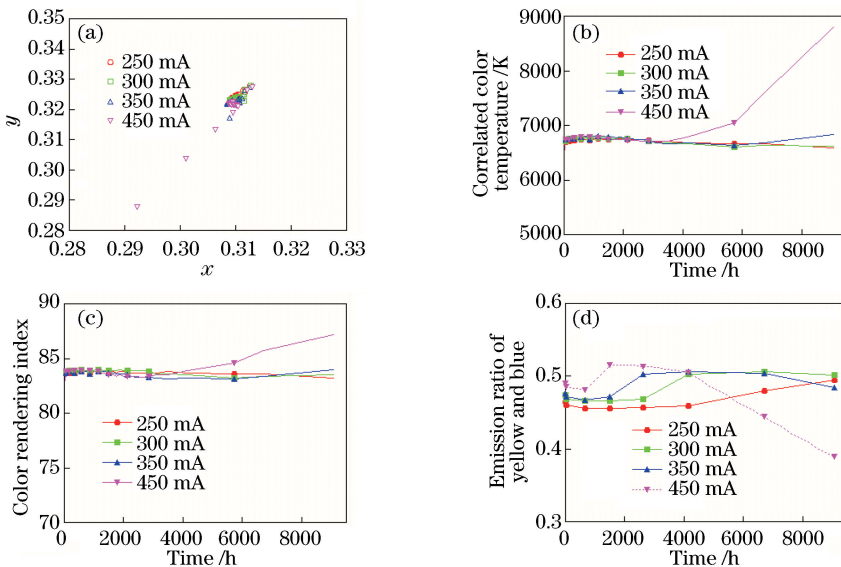


图3 室温下LED球泡灯在不同电流下的性能随老化时间的变化。(a)色坐标;(b)色温;(c)显示指数;(d)荧光粉黄光与芯片蓝光发射强度的比值

Fig. 3 Performances of LED bulbs versus aging time under different currents at room temperature. (a) Chromaticity coordinates; (b) color temperature; (c) color rendering index; (d) emission intensity ratio between yellow phosphor and blue chip



荧光粉自发热现象严重,使荧光粉胶体的温度过高导致固化胶老化和荧光粉退化,使荧光粉激发效率下降,被激发的黄光发射强度降低,出现荧光粉快速失效,导致球泡灯色温严重往冷色调偏移,色坐标减小,显色指数增大。

进一步将 LED 球泡灯进行拆解,分别测试不同电流应力下 LED 球泡灯的红外热分布。由于芯片表面硅胶热辐射系数未知,该红外热分布的温度仅表示相对值,故在大电流下球泡灯铝基板和芯片表面可以承受更高的温度应力。将光源模组中的芯片拆解进行单个蓝光芯片的  $I-V$  曲线测试。从图 4 可以看出,LED 球泡灯在驱动电流为 450 mA 应力老化后,灯具内部的铝基板和驱动电源底座均有变黄,

且每颗白光 LED 均出现黑化现象。从红外热分布图可知,当 450 mA 电流应力作用 LED 球泡灯时,其白光 LED、铝基板和灯罩等部件的温度偏高,白光 LED 封装胶体表面温度高达 89.8 °C。驱动电流为 250,300,350 mA 电流应力作用时,相应的白光 LED 封装胶体表面温度分别为 64.3,69.3,79.3 °C,其铝基板和驱动电源底座均未出现黄化现象。说明在相同的散热条件下,450 mA 高电流驱动时导致球泡灯的灯具散热能力不足;同时高电流驱动产生较强的蓝光激发 YAG:Ce 荧光粉,导致荧光粉胶体退化程度远比电流应力对蓝光芯片的衰减程度大,这与荧光粉与蓝光芯片发射强度比值  $R$  随老化时间变化急剧下降的现象一致。

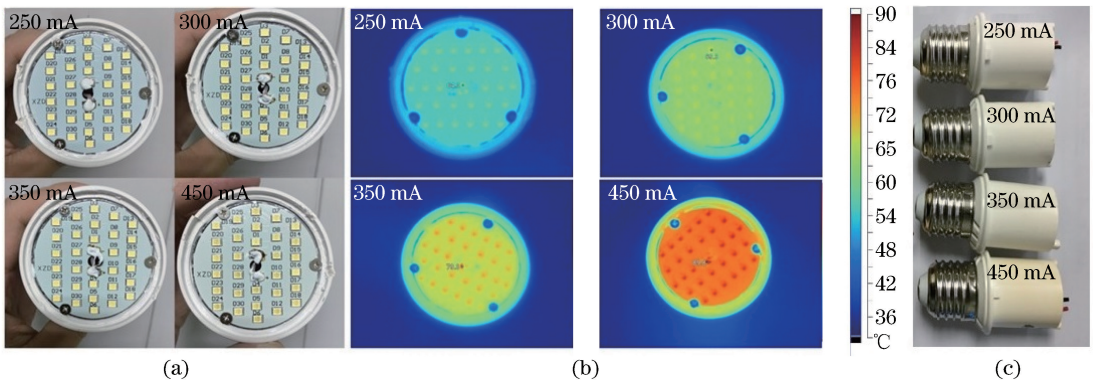


图 4 室温下 LED 球泡灯的光源模组在不同电流下的老化效果。(a)外观图;(b)红外热分布图;(c)驱动电源底座外观图

Fig. 4 Aging effects of light source module of LED bulbs under different currents at room temperature.

(a) Appearance; (b) infrared thermal imaging; (c) substrate of driving power

图 5 表示室温下不同电流应力老化后测试单个白光 LED 的  $I-V$  特性曲线。未老化及 250,300,350,450 mA 的白光 LED 在相同正向电压下,电流呈现减小的趋势,即  $I-V$  曲线的斜率减小,说明芯片内部的串联电阻增大。白光 LED 的串联电阻主要与芯片内部的欧姆接触相关,说明在不同电流老化后,内部欧姆接触变差,串联电阻变大。串联电阻越大,导致蓝光芯片更多的电功率转化成热量,与 450 mA 老化后的灯具白光 LED 表面温度非常高的红外热分布图相符。而造成蓝光芯片的串联电阻变大的原因是芯片在老化后出现更多的内部缺陷,在老化后封装胶的老化对芯片的金线电极进行应力挤压,芯片表面的镀银层受到氧化或者硫化后变黑而出现电阻增大、电流拥堵的现象,且减小出光率<sup>[17, 20-22]</sup>。

### 3.2 电流-温度双应力实验

在电流单应力研究基础上,加入温度老化因子,进行电流-温度联合应力的 LED 球泡灯老化实验。

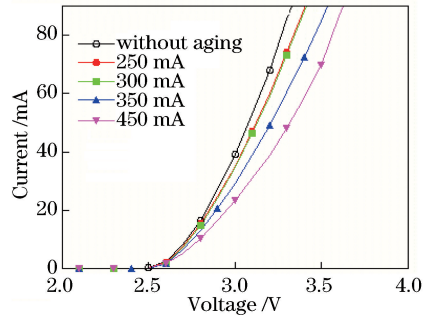


图 5 室温下不同电流老化后的芯片  $I-V$  特性

Fig. 5  $I-V$  characteristics of chips aged under different currents at room temperature

将 250,300,350,450 mA 电流驱动的灯具放入 55 °C 的高温老化箱内进行电流-温度双应力老化实验,结果发现在 250 mA 与 55 °C 的电流-温度联合应力作用下,球泡灯光通量衰减明显加快,老化 6720 h 后,光通量衰减至原始值的 54.34%,相比于电流单应力情况下 250 mA 驱动的球泡灯光通量衰减只有初始值的 83.41%。而 55 °C 时在 300,350,



450 mA 驱动电流下的球泡灯的光通量分别衰减至 44.87%, 35.31%, 19.47%。因大电流和高温双应力作用下球泡灯失效严重, 因此, 选取 250 mA 和 300 mA 驱动电流与温度应力进行研究。图 6(a) 表

示球泡灯的光通量在电流-温度联合应力作用下的变化情况, 在初始 50 h 内变化不大, 而之后在电流-温度联合应力作用下光通量衰减程度明显加快, 4000 h 后均衰减到 70% 以下。

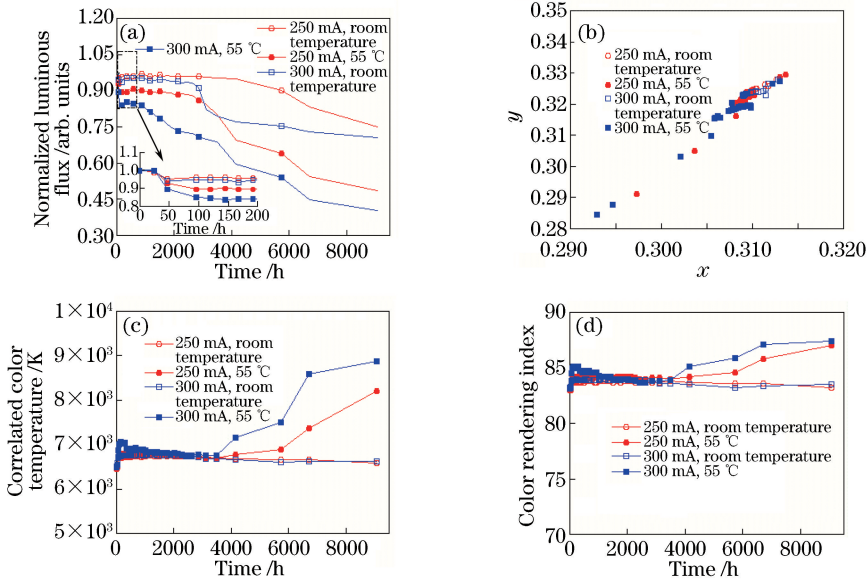


图 6 55 °C 温度下 LED 球泡灯在不同电流下的特性。(a) 光通量维持率; (b) 色坐标; (c) 色温; (d) 显示指数  
Fig. 6 Characteristics of LED bulbs under different currents at 55 °C. (a) Luminous flux maintenance; (b) chromaticity coordinates; (c) color temperature; (d) color rendering index

在电流单应力实验中, 仅在大电流 450 mA 情况下色坐标、色温和显色指数才发生严重偏移, 小电流 250 mA 和 300 mA 保持较稳定; 而比较图 6(b)~(d) 与图 2 和图 3 可以看出, 在温度-电流双应力实验中 250 mA 和 300 mA 驱动的 LED 球泡灯均出现明显的色坐标减小和色温上升的现象, 并且 300 mA 比 250 mA 时变化严重, 同时显色指数略有升高, 这与在室温下电流为 250 mA 和 300 mA 老化后表现较为稳定的现象不一致, 说明荧光粉退化和封装胶体的黑化主要跟温度有关, 高温

能引起封装胶体黑化, 导致封装胶体透光率变小和 YAG:Ce 荧光粉的荧光转换效率变差。图 7(a) 表示荧光粉黄光与芯片蓝光发射强度的比值随电流-温度联合应力作用下的变化曲线, 电流单应力下 250 mA 和 300 mA 驱动球泡灯的荧光粉黄光与芯片蓝光发射强度的比值呈现上升的趋势, 说明电流应力作用下蓝光芯片比 YAG:Ce 荧光粉退化更为严重, 而 55 °C 温度-电流双应力作用下, 球泡灯的 YAG:Ce 荧光粉比蓝光芯片老化更为严重。图 7(b) 表示未老化、250 mA 和 300 mA 在室温和 55 °C 下

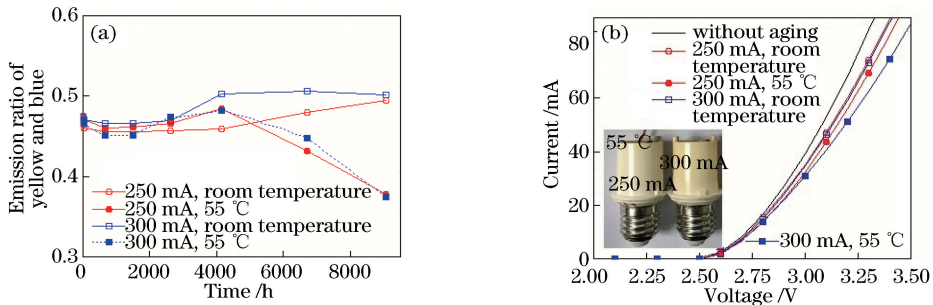


图 7 温度-电流应力对 LED 球泡灯特性的影响。(a) 荧光粉黄光与芯片蓝光发射强度比; (b) 芯片 I-V 曲线图与驱动电源底座外观图

Fig. 7 Effect of joint temperature-current stress on characteristic of LED bulbs. (a) Emission intensity ratio between yellow phosphor and blue chip; (b) I-V curves of chips and substrate of driving power

老化后的白光 LED 的  $I-V$  特性,对比发现 250 mA 和 300 mA 在室温下老化后  $I-V$  曲线变化很小,但是在 55 °C 高温下老化后,相同电流下的驱动电压升高,相应的  $I-V$  曲线斜率变小,说明串联电阻更大,欧姆接触变差。同时,在 55 °C 高温下 250 mA 和 300 mA 电流驱动的球泡灯的灯具驱动电源底座出现严重的黄化现象,甚至比室温下 450 mA 的老化灯具情况更明显。

图 8 为 55 °C 温度-电流应力对 LED 球泡灯的特性影响。如图 8(a)所示,在高温 55 °C 环境下,从 250 mA 和 300 mA 的灯具老化后的发射光谱可以看出,荧光粉黄光波段相对于未老化前的衰减非常严重,并且观察到每一颗白光 LED 芯片在老化后的荧光粉胶体位置均出现黑化,同时球泡灯的铝基板和灯罩等均发生黄化,与图 4 比较,这两种电流驱动的球泡灯光源模组均未出现黄化和黑化现象,可以得出温度应力使 LED 球泡灯失效更严重。从相应

的红外热分布图 8(b)可以看出,在高温 55 °C 下 250 mA 和 300 mA 驱动的 LED 球泡灯,光源模组中白光 LED 表面温度分别高达 80.0 °C 和 84.8 °C,对比在室温下同样电流驱动的球泡灯光源模组中白光 LED 表面温度仅为 64.3 °C 和 69.3 °C(如图 4 所示),分别提高了 15.7 °C 和 15.5 °C;而白光 LED 球泡灯的热沉表面温度分别高达 71.6 °C 和 77.3 °C,比室温下老化的球泡灯热沉升高了 17.7 °C 和 18.5 °C。这些结果进一步说明:在 55 °C 高温应力作用下,灯具热沉不足以支撑在这种环境下工作的散热,蓝光芯片结温升高导致荧光粉和封装胶体升温,产生蓝光芯片退化、荧光粉激发效率下降和封装胶体黑化等问题,最终导致白光 LED 出光率降低、光通量衰减等现象。此外,高温情况下,球泡灯的驱动电源、灯具的铝基板和散热器等都会释放出硫化物、卤化物等,可能会导致白光 LED 支架的镀银层发生硫化变黑等。

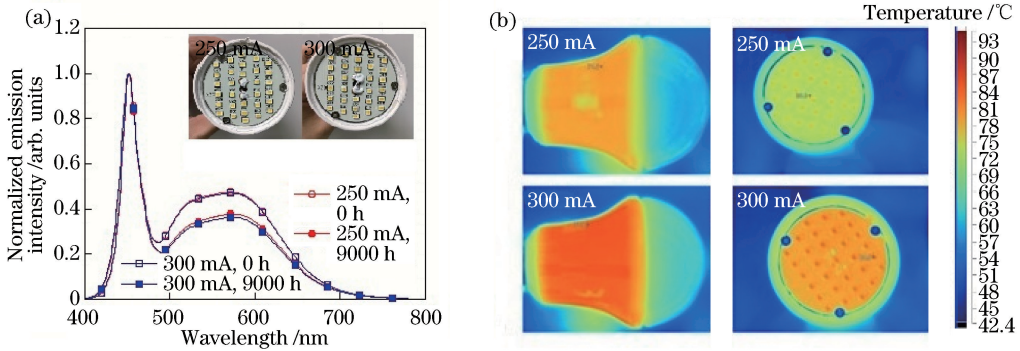


图 8 55 °C 温度-电流应力对 LED 球泡灯特性的影响。(a)光源模组的老化图和光谱变化图;(b)光源模组的红外热分布图  
Fig. 8 Effect of joint temperature-current stress on characteristics of LED bulbs at 55 °C temperature. (a) Aging photographs of light source modules and spectral changes; (b) infrared thermal distributions of light source modules

### 3.3 电流单应力实验加速 LED 球泡灯老化的寿命预测

电流-温度双应力老化加速实验是基于单应力实验上的更为快速更复杂的老化实验,不能单独将温度单应力的老化情况或者电流单应力老化情况相加或者相乘作为双应力与灯具老化之间的关系,双应力之间存在一定相互影响的作用<sup>[23-24]</sup>。本研究通过电流、温度和电流-温度双应力等分别作用 LED 球泡灯进行失效分析,研究了 LED 球泡灯的光通量、色坐标、色温、显色指数、光谱、伏安特性和灯具的红外热分布等光电性能的变化规律,结果发现电流作为单应力老化实验时不但能产生电流应力,同时在大电流情况下工作温度上升还会产生温度应力。因此,电流应力对 LED 的可靠性分析具有重要的应用价值。基于老化数据和已有的寿命预测模

型,对不同电流大小的 LED 球泡灯进行寿命预测。研究认为,电流单应力寿命模型相比于温度单应力下寿命预测模型更适用于 LED 球泡灯的实际老化寿命,与上文研究内容相互印证。

老化 6720 h 后,正常工作电流 250 mA、加速老化电流为 300,350,450 mA 的灯具光通量分别衰减至 83.41%,73.04%,68.96%,52.21%,根据以  $L_{70}$  的寿命标准和外推法寿命预测数学模型通过计算预测出正常工作电流下的灯具寿命。当 LED 灯具在额定电流和室温环境驱动下,可以认为其光通量随时间变化满足指数关系,采用外推法来预测 LED 灯具在不同加速电流应力下的平均老化寿命<sup>[13]</sup>,表达式为

$$P_t = P_0 \exp(-t/\tau), \quad (1)$$

式中: $P_t$  为老化  $t$  时间后的光通量; $P_0$  为 LED 灯具初始光通量; $\tau$  为与电流相关的常数。灯具老化

6720 h后,大电流灯具均衰减至原始值70%以下,力下的老化寿命如表1所示。抽取相关数据通过(1)式计算可得不同电流大小应

表1 不同电流应力下的老化寿命

Table 1 Aging lifetimes under different current stresses

Temperature /°C	Current /mA	Decay luminescence ratio /%	Time /h	$\tau$	Lifetime /h
25	250	86	6720	45993	16404
25	300	82	3120	15802	5636
25	350	86	1632	11110	3963
25	450	86	936	6189	2208

通过表1中可以看出电流作为单应力也具有加快老化的作用,并且在大电流情况下老化速度较快,寿命较短。由于正常电流250 mA工作下的灯具在6720 h仍较稳定,仅衰减至原始83%,因此要计算正常电流下的灯具寿命需建立LED灯具在大电流情况下与正常电流下的光通量衰减数学模型<sup>[5]</sup>,即

$$T_0 = T_t \left( \frac{I_0}{I_t} \right)^{-n}, \quad (2)$$

式中: $T_0$ 和 $I_0$ 分别为正常工作下的寿命和电流大小; $T_t$ 和 $I_t$ 为不同加速电流下的老化寿命和电流大小; $n$ 为幂指数。通过(2)式拟合幂指数 $n$ 后可算得正常电流工作下的灯具寿命,如表2所示。

表2 LED灯具拟合幂指数 $n$ 和预测正常工作的寿命Table 2 Fitted power exponent  $n$  and predicted normal working lifetime of LED device

Current $I_0$ /mA	Current $I_t$ /mA	Fitting value $n$	Lifetime /h
300	350	2.29	7189
300	450	2.31	7217
350	450	2.33	7185

结果显示电流为300,350,450 mA的灯具样品在正常工作250 mA电流时的寿命分别为7189,7217,7185 h,3组加速老化寿命预测值误差较小。并且通过图1光通量变化图可知,250 mA正常电流下老化的灯具已结束稳定时期,出现下降趋势,根据其他电流老化情况可知下降均较快。在9072 h老化后,正常电流下的灯具衰减至原始值的75%左右,按计算可得7200 h左右会下降至原始值70%左右,基本误差不大,所以该寿命计算值可代表正常工作电流下的LED灯具寿命。本实验通过LED灯具各光电性能的变化规律分析失效机理,可较准确地预测灯具在不同电流应力下的老化寿命。基于以上研究,说明常规的老化实验算法不能满足温度和电流应力下的LED寿命预测,建议寿命预测模型既要考虑热量又要考虑电流,对灯具可靠性研究具有一定的借鉴意义<sup>[23]</sup>。

## 4 结 论

对LED球泡灯在温度、电流单应力和温度-电流双应力作用下进行老化可靠性实验,通过光通量、色坐标、色温、显色指数、发射光谱及其灯具结构的变化来讨论失效机理。大电流会造成芯片光电特性衰减,电流过大同时带来大热量造成荧光粉退化;温度-电流双应力老化能加速灯具老化,在高温和大电流条件下造成荧光粉退化更严重。将LED灯具结构引起的散热性能不佳和硫化可能性考虑进失效机理中,高温老化过程中荧光粉胶体和灯具支架、铝基板等均出现黄化现象,更贴切实际LED芯片应用情况。最终在不同的电流应力下基于外推法预测出灯具老化寿命。本文采用了比温度或电流单应力实验更加完善的老化实验,研究了电流和温度对LED球泡灯可靠性的影响,进行了更透彻的失效机理分析,为LED产业提供理论支持,具有实际应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Yazdan Mehr M, van Driel W D, Koh S, *et al.* Reliability and optical properties of LED lens plates under high temperature stress [J]. *Microelectronics Reliability*, 2014, 54(11): 2440-2447.
  - [2] Li X P, Chen L, Chen M. An approach of LED lamp system lifetime prediction [C] // 2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability, September 14-17, 2011, Bangkok, Thailand. New York: IEEE, 2011: 110-114.
  - [3] Trevisanello L, Meneghini M, Mura G, *et al.* Accelerated life test of high brightness light emitting diodes [J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2008, 8(2): 304-311.
  - [4] Zou S P, Wu B X, Wan Z P, *et al.* Effect of current-temperature stress on the reliability of GaN LED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(1): 124-129.
- 邹水平, 吴柏禧, 万珍平, 等. 电-热应力对 GaN 基



- 白光 LED 可靠性的影响[J]. 发光学报, 2016, 37(1): 124-129.
- [5] Wang J, Huang X, Liu L, *et al.* Effect of temperature and current on LED luminous efficiency [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2008, 29(2): 358-362.  
王健, 黄先, 刘丽, 等. 温度和电流对白光 LED 发光效率的影响[J]. 发光学报, 2008, 29(2): 358-362.
- [6] Xiao C D, Liu C J, Liu W D, *et al.* Reliability assessment of LED lamp based on acceleration degradation test [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(9): 1143-1153.  
肖承地, 刘春军, 刘卫东, 等. 基于加速性能退化的 LED 灯具可靠性评估[J]. 发光学报, 2014, 35(9): 1143-1153.
- [7] Wagner M, Herzog A, Ganev H, *et al.* LED aging acceleration: An analysis from measuring and aging data of 14000 hours LED degradation[C]//2015 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA), November 2-4, 2015, Shenzhen, China. New York: IEEE, 2015: 75-78.
- [8] Wu Y Y, Feng S W, Qiao Y B, *et al.* Study of current crowding effect and reliability of LED devices [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(8): 1051-1056.  
吴艳艳, 冯士维, 乔彦斌, 等. 电流拥挤效应与 LED 器件可靠性分析[J]. 发光学报, 2013, 34(8): 1051-1056.
- [9] Meneghesso G, Levada S, Pierobon R, *et al.* Degradation mechanisms of GaN-based LEDs after accelerated DC current aging [C] // Digest. International Electron Devices Meeting, December 8-11, 2002, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2002: 103-106.
- [10] Qian M H, Lin Y D, Sun Y J. Lifeprediction model for LEDs based on the photo-electro-thermal-life theory [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0823001.  
钱敏华, 林燕丹, 孙耀杰. 基于光-电-热-寿命理论的 LED 寿命预测模型[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0823001.
- [11] Yang S H, Wu F G, Zhang C H. Analysis of failure mechanisms of white LEDs [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(6): 857-859, 882.  
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, 30(6): 857-859, 882.
- [12] Chan C J, Hsu F M, Su Y F, *et al.* Study on current and junction temperature stress aging effect for accelerated aging test of Light emitting diodes [C] // 2016 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), April 20-22, 2016, Sapporo, Japan. New York: IEEE, 2016: 62-65.
- [13] Narendran N, Bullough J D, Maliyagoda N, *et al.* What is useful life for white light LEDs? [J]. Journal of the Illuminating Engineering Society, 2001, 30(1): 57-67.
- [14] Wang Y. The Research of LED Lamp Lifetime Prediction Methodology [D]. Shanghai: Fudan University, 2011.  
王鋈. LED 灯的寿命预估方法研究[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [15] Cai M, Yang D G, Koh S, *et al.* Accelerated testing method of LED luminaries [C] // 2012 13th International Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, April 16-18, 2012, Cascais, Portugal. New York: IEEE, 2012: 1/6-6/6.
- [16] Yuan F. The study on LED reliability under the condition of current-temperature double accelerated stress [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2014.  
袁飞. 基于电流和温度双重应力加速的 LED 可靠性技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2014.
- [17] Meneghesso G, Levada S, Zanoni E, *et al.* Failure mechanisms of GaN-based LEDs related with instabilities in doping profile and deep levels [C] // 2004 IEEE International Reliability Physics Symposium. Proceedings, April 25-29, 2004, Phoenix, AZ, USA. New York: IEEE, 2004: 474-478.
- [18] Wu F G, Zhao W, Yang S H, *et al.* Failure modes and failure analysis of white LEDs [C] // 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, August 16-19, 2009, Beijing, China. New York: IEEE, 2009: 4-978-4-981.
- [19] Chang M H, Das D, Varde P V, *et al.* Light emitting diodes reliability review [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(5): 762-782.
- [20] Jung E, Kim H. Rapid optical degradation of GaN-based light-emitting diodes by a current-crowding-induced self-accelerating thermal process [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(3): 825-830.
- [21] Jung E, Kim S, Kim H. Effects of temperature on current crowding of GaN-based light-emitting diodes

- [J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(2): 277-279.
- [22] Jeong S, Kim M S, Lee S N, *et al.* Forward and reverse current aging of GaN-based light-emitting diodes fabricated with Ag-based reflective electrodes [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2019, 90: 72-77.
- [23] Chan C J, Hsu F M, Su Y F, *et al.* Study on current and junction temperature stress aging effect for accelerated aging test of light emitting diodes [C] // 2016 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), April 20-22, 2016, Sapporo, Japan. New York: IEEE, 2016: 62-65.
- [24] He K. Techniques of predicting life of LED [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2011. 何况. LED寿命预测技术 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2011.