

文章编号: 1000-7032(2024)07-1196-15

铜基板面积、焊锡和导电铜箔厚度对高功率密度LED 极限光电性能的影响

黄林凤, 熊传兵*, 汤英文, 袁 慧, 马依豪, 杨欣雨

(闽南师范大学 物理与信息工程学院, 福建 漳州 363000)

摘要: 高功率密度LED器件能实现传统光源和普通LED器件无法实现的诸多功能, 将半导体照明技术链推向了一个崭新的高度。在实际应用中, 单颗LED器件需要在数百瓦及近100 A电流下工作, 铜基板面积、焊锡和导电铜箔厚度均会对该类型LED器件的极限光电性能这一关键指标产生显著影响。本文将单颗极限电功率为300 W和200 W的两种规格的LED蓝光和白光器件, 分5 μm 、100 μm 和200 μm 三个焊锡厚度, 分别贴片焊接在直径为20 mm、25 mm和32 mm三种不同面积的热电分离铜凸台基板上, 测试了当散热器温度分别为25 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $^{\circ}\text{C}$ 、75 $^{\circ}\text{C}$ 和100 $^{\circ}\text{C}$ 时蓝光LED器件光功率、白光LED光通量及其灯板导线焊点间的电压随电流的变化。同时, 还研究了铜基板的导电铜箔厚度分别为70 μm 和140 μm 时, 极限电功率为150 W的蓝光LED器件的*I-L*特性和*I-V*特性, 并对其极限发光进行了研究。研究结果表明, 焊锡厚度、铜基板面积和导电铜箔厚度均会对LED的极限发光强度和工作电压产生明显影响; 减小焊锡厚度和增加铜基板面积能显著提高高功率LED器件的极限光强, P110和T90两种规格蓝光LED器件极限光功率的提升幅度高达16%和19%, 白光器件极限光通量的提升幅度均高达15%左右; 当铜箔厚度由70 μm 增加到140 μm 、散热器温度为25 $^{\circ}\text{C}$ 时, P70蓝光LED的极限光功率提升幅度为9.2%, 50 $^{\circ}\text{C}$ 和75 $^{\circ}\text{C}$ 时极限光功率提升幅度为12.9%, 100 $^{\circ}\text{C}$ 时极限光功率提升幅度为16.4%。

关键词: 高功率密度LED; 热电分离铜凸台基板; 焊锡; 导电铜箔

中图分类号: TN304

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240090

Influence of Copper Substrate Area, Solder and Copper Foil Thickness on Maximum Output Light Intensity and Voltage of High Power Density LEDs

HUANG Linfeng, XIONG Chuanbing*, TANG Yingwen, YUAN Hui, MA Yihao, YANG Xinyu

(School of Physics and Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)

* Corresponding Author, E-mail: chuanbingxiong@126.com

Abstract: High power density LED device can achieve many functions that is the traditional light sources and ordinary LED devices cann't achieve, and it is pushing the LED lighting industry technology chain into a new level. In practical applications, the high power density LED needs to work at hundreds of watts and nearly 100 A current. The copper substrate area, solder tin and copper foil thickness will have a significant effect on the maximum light intensity, it is the most important indicator of this type LED. In this paper, we have welded the LEDs (300 W and 200 W, blue and white light) onto the thermoelectric separation copper substrates (Three diameters of the substrate: 32 mm, 25 mm, 20 mm. Three solder tin thicknesses between the LED and the substrate: 5 μm , 100 μm , 200 μm). The *I-L* and *I-V* curves of the blue and white light LEDs have been tested, under different radiator temperatures (25 $^{\circ}\text{C}$, 50 $^{\circ}\text{C}$, 75 $^{\circ}\text{C}$ and 100 $^{\circ}\text{C}$, respectively). The *I-L* and *I-V* characteristics of the blue light LED devices with a maximum electrical power of 150

收稿日期: 2024-04-01; 修订日期: 2024-04-22

基金项目: 福建省技术创新重点攻关及产业化项目(2023QX007); 福建省高校产学研合作科技计划项目(2023H6018)

Supported by Key Technologies Innovation and Industrialization Projects in Fujian Province (2023QX007); Industry-University-Research Cooperation Project of Fujian Science and Technology Department(2023H6018)

W were also studied when the conductive copper foil thickness of the copper substrate was 70 μm and 140 μm , respectively. And its maximum optical output was studied. The research results indicate that the thickness of solder tin, the area of copper substrate, and the thickness of conductive copper foil all have significant effects on the maximum luminous intensity and operating voltage of the LEDs. The decrease of solder thickness and the increase of copper substrate area can significantly improve the maximum light intensity of the LEDs, the increase of maximum blue light optical power of the P110 and T90 LEDs can reach up to 16% and 19%, the increase of the maximum luminous flux of the white light LEDs is about 15%, respectively. When the thickness of the copper foil increases from 70 μm to 140 μm , the maximum optical power increase of P70 blue LED is 9.2% when the heat sink temperature is 25 $^{\circ}\text{C}$, 12.9% at 50 $^{\circ}\text{C}$ and 75 $^{\circ}\text{C}$, and 16.4% at 100 $^{\circ}\text{C}$.

Key words: high power density LED; thermoelectric separation copper substrate; soldering tin; conductive copper foil

1 引言

我国目前是LED的最大生产国、出口国和消费国,LED全产业链的年产值近万亿元,LED产业大国地位凸显,然而在诸多方面还不是LED强国。当前,我国存在部分高端LED器件仍然依赖进口的尴尬局面,其中高功率密度LED器件是依赖进口的主要品类之一,其牵涉到诸多科学和技术问题,需要多学科交叉、产学研用结合对其进行深入研究,才能实现该器件的进口替代和超越,从而不受制于人^[1-10]。高功率密度LED器件之所以成为当前研究和产业的热点,其原因在于该器件促使了LED照明由以往的“替代照明时代”迈向了现在的“超越照明时代”,它能实现传统光源和普通LED器件无法实现的诸多功能^[1-10]。

随着锂离子电池储电量及其极限电流的提高,以及碳化硅和氮化镓电子器件承载电流能力的提高,形成了LED器件、锂离子电池与碳化硅及氮化镓MOS(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET的缩写)器件三者相互促进、协同发展的趋势,将半导体照明技术推向了一个崭新的高度,其持续的发展和创新将奠定我国“超越照明”产业的显著国际优势。当前,在离网照明领域某些应用场合,需要LED器件和MOS管器件承受锂离子电池相当于直通LED时的巨大电流,单颗LED器件需要在数百瓦及近100 A电流下工作,在可恢复性致盲、海洋渔业和警用爆闪等“超越照明”领域获得了重要应用,并不断拓展,正在诞生诸多新应用、新市场,给整个照明产业链带来了新的发展机遇。

在实际应用中,高功率密度LED不以省电为主要目标,它一般要求器件在光饱和的极限情况下工作(也即电流增加LED的发光不再增加),使

其尽量获得高光功率密度输出,从而实现更佳的短暂可恢复性致盲和远程照射等应用效果。因此,高功率LED器件的极限发光性能成为重要研究课题。

高功率密度LED器件均是将其用锡膏贴片焊接在热电分离铜凸台基板上^[6-8],然后将其与散热器和驱动电源相连接,再加上光学部件组装成照明应用产品。在高功率大电流工作情况下,与之连接的铜凸台基板面积、导电铜箔厚度和贴片焊锡厚度等对LED器件光电性能会产生显著影响,然而这些关键性的研究还鲜有报道。

本文在热电分离铜凸台基板上贴片焊接了不同规格的高功率蓝光和白光LED器件,对铜基板面积、焊锡厚度和铜基板导电铜箔厚度对高功率密度LED器件极限光电性能的影响进行了深入研究。

2 实验

2.1 样品制备

研究铜基板面积和焊锡厚度对LED极限光电性能的影响采用两种规格的LED器件,分别为单颗极限功率300 W和200 W的陶瓷封装器件,器件制造工艺已有报道^[6-8]。300 W器件的封装尺寸为11 mm×11 mm,由25颗1 397 μm ×1 397 μm (55 mil×55 mil)倒装芯片并联共晶封装而成,器件厚度为800 μm ,文中称该器件为P110。200 W器件的封装尺寸为10 mm×11 mm,由16颗55 mil×55 mil倒装芯片并联共晶封装而成,器件厚度为800 μm ,文中称该器件为T90。

研究了铜基板面积和焊锡厚度对LED性能影响的样品,如表1所示。表中样品的铜基板导电铜箔厚度均为140 μm (在PCB行业中,一般用

表 1 研究铜基板面积和焊锡厚度对 LED 性能影响的样品

Tab. 1 The samples for studing the influence of the copper substrate area and the solder thickness on the LED performance

样品	LED 器件	铜基板尺寸/ mm	器件光色	焊锡厚度/ μm	样品	LED 器件	铜基板尺寸/ mm	器件光色	焊锡厚度/ μm
S01	P110	32	蓝光	5	S19	T90	32	蓝光	5
S02				100	S20				100
S03				200	S21				200
S04			白光	5	S22			白光	5
S05				100	S23				100
S06				200	S24				200
S07		25	蓝光	5	S25		25	蓝光	5
S08				100	S26				100
S09				200	S27				200
S10			白光	5	S28			白光	5
S11				100	S29				100
S12				200	S30				200
S13		20	蓝光	5	S31		20	蓝光	5
S14				100	S32				100
S15				200	S33				200
S16			白光	5	S34			白光	5
S17				100	S35				100
S18				200	S36				200

盎司作为导电铜箔厚度,对应英文单位为 OZ, 1 OZ 的意思是重量 1 OZ 的铜均匀平铺在 1 平方英尺的面积上所达到的厚度,1 OZ 厚度的铜箔为 35.56 μm,为了使用国际单位行文和简捷,本文 2 OZ 铜箔用 70 μm 称谓,4 OZ 铜箔用 140 μm 称谓。国内大功率 LED 器件的热电分离铜基板,其铜箔厚度一般为 0.8 OZ,即 28.448 μm。随着大瓦数高功率密度 LED 器件量产技术的成熟,从 2023 年开始,2 OZ 和 4 OZ 厚度铜箔的铜基板在国内已逐渐开始使用。目前,我国铜凸台基板行业技术链、产业链和供应链的铜箔厚度上限是 4 OZ),铜基材厚度为 2 mm。

焊锡厚度为 100 μm 和 200 μm 的样品,其厚度由印刷锡膏的钢网厚度控制,这两种焊锡厚度是工业化生产常用厚度。5 μm 厚度的焊锡是在热台上焊灯珠时,熔化状态给灯珠加一定压力将灯珠挤压靠底,挤出多余焊锡,然后带压将铜基板和 LED 撤离热台并冷却凝固,最后研磨断面测得焊锡厚度为 5 μm。本文所用焊锡为 Sn99Ag0.3 Cu0.7 无铅高温焊锡,其熔点为 217 ℃,热导率为 0.2 W/(cm·K)。

图 1 是两种 LED 器件发光面和电极面、两种未焊接 LED 器件的 32 mm 直径热电分离铜凸台基板和表 1 所列蓝光和白光样品的实物照片。在图 1 中,未全部拍照表 1 所列 36 个样品照片。当 LED 器件规格与铜基板规格均相同、仅焊锡厚度

不同时,其一小组 3 个样品拍照的效果完全一致,因此用 12 张照片表达 36 个样品。

研究导电铜箔厚度对 LED 性能影响的样品,如表 2 所示。表 2 中 LED 器件的封装尺寸为 7 mm×7 mm,由 16 颗 1 092 μm×1 092 μm(43 mil×43 mil)倒装芯片并联共晶封装而成,器件厚度为 800 μm,文中称该器件为 P70。样品 LED 器件与铜基板之间的焊锡厚度均为 5 μm,实现方法如前所述。铜基板的铜基材厚度为 1.5 mm,两种铜箔的厚度分别为 70 μm 和 140 μm,铜基板尺寸为 20 mm,其形状与图 1 中 20 mm 基板一致。

表 2 中所用样品实物图片与图 1 中 20 mm 基板的样品一致,仅 LED 器件尺寸不同。

图 2 是不同焊锡厚度样品的断面图,光学显微镜图片为铜基板凸台部位附近的研磨断面。

本文所用 LED 器件均已实现量产,实验数据的重复性和准确性均经过了批量化反复验证。

2.2 样品测试

光谱采集系统为国产杭州远方 HASS2000 光谱测试系统,积分球的 LED 样品安装夹具为变温循环水冷散热紫铜测试头,循环水流量是 6 L/min,控温水槽体积为 100 L,控温范围为室温至 100 ℃。积分球与光谱仪连接的光纤为芯径 100 μm 的石英光纤。将图 1 中的样品焊上导线后,安装在积分球循环变温水冷测试头上进行测试。外接电源为 0~200 A 可调的恒流电源。

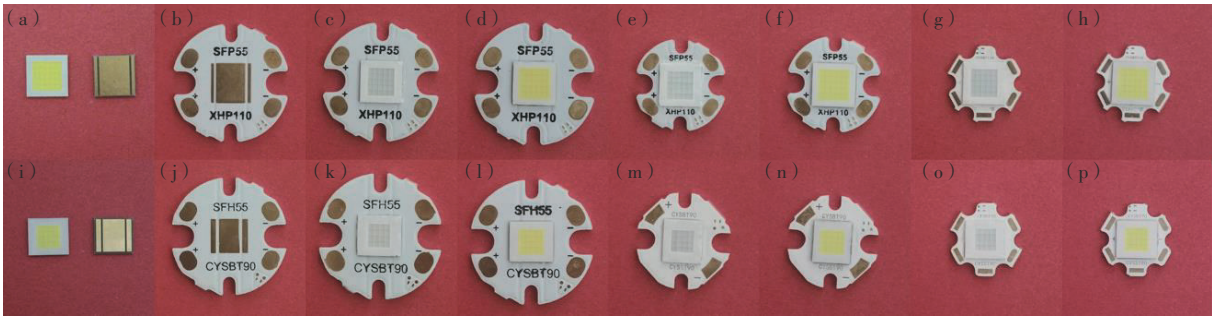


图 1 LED 器件、铜基板及 LED 焊接铜基板后的实物图。(a)P110 规格 LED 器件发光面与电极面;(b)P110 器件的 32 mm 铜基板;(c)P110 蓝光器件焊在 32 mm 铜基板上;(d)P110 白光器件焊在 32 mm 铜基板上;(e)P110 蓝光器件焊在 25 mm 铜基板上;(f)P110 白光器件焊在 25 mm 铜基板上;(g)P110 蓝光器件焊在 20 mm 铜基板上;(h)P110 白光器件焊在 20 mm 铜基板上;(i)T90 规格 LED 器件发光面与电极面;(j)T90 器件的 32 mm 铜基板;(k)T90 蓝光器件焊在 32 mm 铜基板上;(l)T90 白光器件焊在 32 mm 铜基板上;(m)T90 蓝光器件焊在 25 mm 铜基板上;(n)T90 白光器件焊在 25 mm 铜基板上;(o)T90 蓝光器件焊在 20 mm 铜基板上;(p)T90 白光器件焊在 20 mm 铜基板上

Fig. 1 Physical images of the LED devices, copper substrates, and the devices soldered on the copper substrates. (a)The front side and back side of P110 LED device. (b)The 32 mm copper substrate for the P110 LED. (c)The P110 blue light LED soldered on a 32 mm copper substrate. (d)The P110 white light LED soldered on a 32 mm copper substrate. (e)The P110 blue light LED soldered on a 25 mm copper substrate. (f)The P110 white light LED soldered on a 25 mm copper substrate. (g)The P110 blue light LED soldered on a 20 mm copper substrate. (h)The P110 white light LED soldered on a 20 mm copper substrate. (i)The front side and back side of T90 LED device. (j)The 32 mm copper substrate for the T90 LED. (k)The T90 white light LED soldered on a 32 mm copper substrate. (l)The T90 white light LED soldered on a 32 mm copper substrate. (m)The T90 blue light LED soldered on a 25 mm copper substrate. (n)The T90 white light LED soldered on a 25 mm copper substrate. (o)The T90 blue light LED soldered on a 20 mm copper substrate. (p)The T90 white light LED soldered on a 20 mm copper substrate

表 2 研究导电铜箔厚度对 LED 性能影响的样品
Tab. 2 The samples for studing the influence of the copper foil thickness on the LED performance

样品	LED 器件	铜基板尺寸/ mm	器件光色	铜箔厚度/ μm
S37	P70	20	蓝光	70
S38				140

3 结果与讨论

3.1 蓝光样品 I-L 特性

图 3 是 P110 和 T90 两种规格 LED 蓝光器件在水冷散热器温度为 25 ℃ 时,蓝光光功率随正向驱动电流的变化图(I-L 特性图)。从图中可以看出:(1)铜基板面积和焊锡厚度均对器件的 I-L 特性有显著影响,其极限光功率明显不同。(2)铜基板面积相同时,焊锡厚度越薄,LED 极限光功率越高。焊锡厚度相同时,铜基板面积越大,极限光功率越高。焊锡厚度对 LED 极光功率的影响比铜基板面积更为明显。(3)焊在 32 mm 铜基板上的 P110 蓝光器件,当焊锡厚度为 5 μm 时,其蓝光光功率极限为 90.7 W;当焊锡厚度为 100 μm 时,其蓝光光功率极限为 86.2 W;当焊锡厚度为 200 μm

时,其蓝光光功率极限为 82.1 W。32 mm 铜基板,焊锡厚度不同时,P110 和 T90 器件的蓝光光功率极限值相差均为 10% 左右(5 μm 与 200 μm 厚度对比)、5% 左右(5 μm 与 100 μm 厚度对比)、5% 左右(100 μm 与 200 μm 厚度对比)。三种规格的铜基板,其焊锡厚度不同引起的极限光功率的差值比率基本一致。(4)当焊锡厚度相同时,铜基板面积越大,极限光功率越高。极限光功率相差 2% 左右(32 mm 与 25 mm 对比、25 mm 与 20 mm 对比),焊 32 mm 基板的器件其极限蓝光功率比 20 mm 基板大 4% 左右,三种焊锡厚度的样品基板面积不同引起的极限光功率差值均是 2% 和 4%。(5)P110 器件焊锡厚度为 200 μm 焊在 20 mm 铜基板时,其光功率极限是 5 μm 焊锡厚度焊在 32 mm 铜上器件的 86.5%。T90 器件焊锡厚度为 200 μm 焊在 20 mm 铜基板时,其光功率极限是 5 μm 焊锡厚度焊在 32 mm 铜基板上器件的 84.7%。

LED 器件通电工作时,发光发热同时进行。对于仅需要短暂点亮的终端应用产品,其短时间点亮产生的热量远小于散热器的热容量,因此不会因短暂工作引起器件工作环境温度的显著升

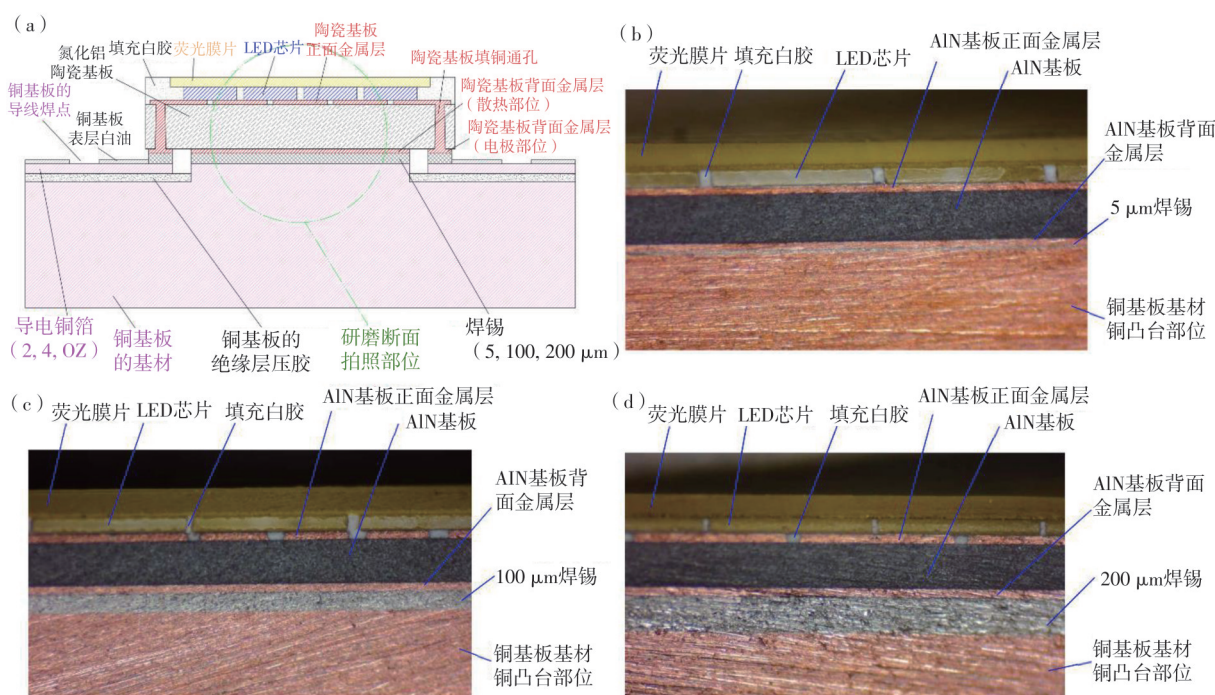


图2 样品断面图。(a)断面结构示意图;(b)5 μm 焊锡样品的研磨断面照片;(c)100 μm 焊锡样品的研磨断面照片;(d)200 μm 焊锡样品的研磨断面照片

Fig. 2 Cross-sectional view of the samples. (a) Schematic diagram of the cross-sectional view. (b) Cross section photo of the 5 μm solder thickness sample. (c) Cross section photo of the 100 μm solder thickness sample. (d) Cross section photo of the 200 μm solder thickness sample

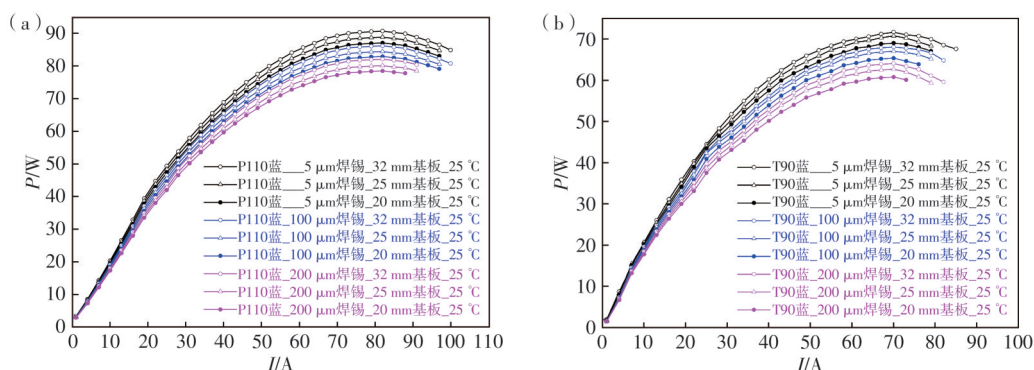


图3 蓝光器件室温 $I-L$ 曲线对比。(a)P110 蓝光器件的室温 $I-L$ 对比;(b)T90 蓝光器件的室温 $I-L$ 对比

Fig. 3 Comparison of room temperature $I-L$ curves of the blue light devices. (a) The comparison of room temperature $I-L$ curves of the P110 blue light LED. (b) The comparison of room temperature $I-L$ curves of the T90 blue light LED

高,此时器件室温 $I-L$ 特性对应用产品的设计就具有明确指导意义。当 LED 器件需要持续爆闪工作或一直持续点亮时,器件发光时产生的热量会逐渐接近散热器的热容量并通过空气对流散热,LED 器件会处于热平衡状态下的某一温度工作,散热器设计不同则器件工作的环境温度会有所不同^[6-8]。此时,变温 $I-L$ 特性对于应用产品的设计才具有现实指导意义,且具有普遍性,因此本文研究了器件的变温 $I-L$ 特性。图 4 是 P110 和 T90 两种规格 LED 蓝光器件的变温 $I-L$ 曲线图,分别测试并

对比了变温水冷散热器为 25 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $^{\circ}\text{C}$ 、75 $^{\circ}\text{C}$ 和 100 $^{\circ}\text{C}$ 四个温度时,两种器件分三个焊锡厚度焊在三种不同面积铜基板上的蓝光 $I-L$ 特性。图 5 是两种蓝光器件在不同温度时光功率极限值的对比图。

从图 4 和图 5 可以看出,两种规格的器件均呈现如下规律:(1)当散热器温度不同时,不同焊锡厚度和不同基板面积的两种 LED 蓝光器件,其 $I-L$ 曲线及极限光功率均有明显不同;(2)当焊锡厚度为 5 μm 时,器件的极限光功率随温度升高而下降

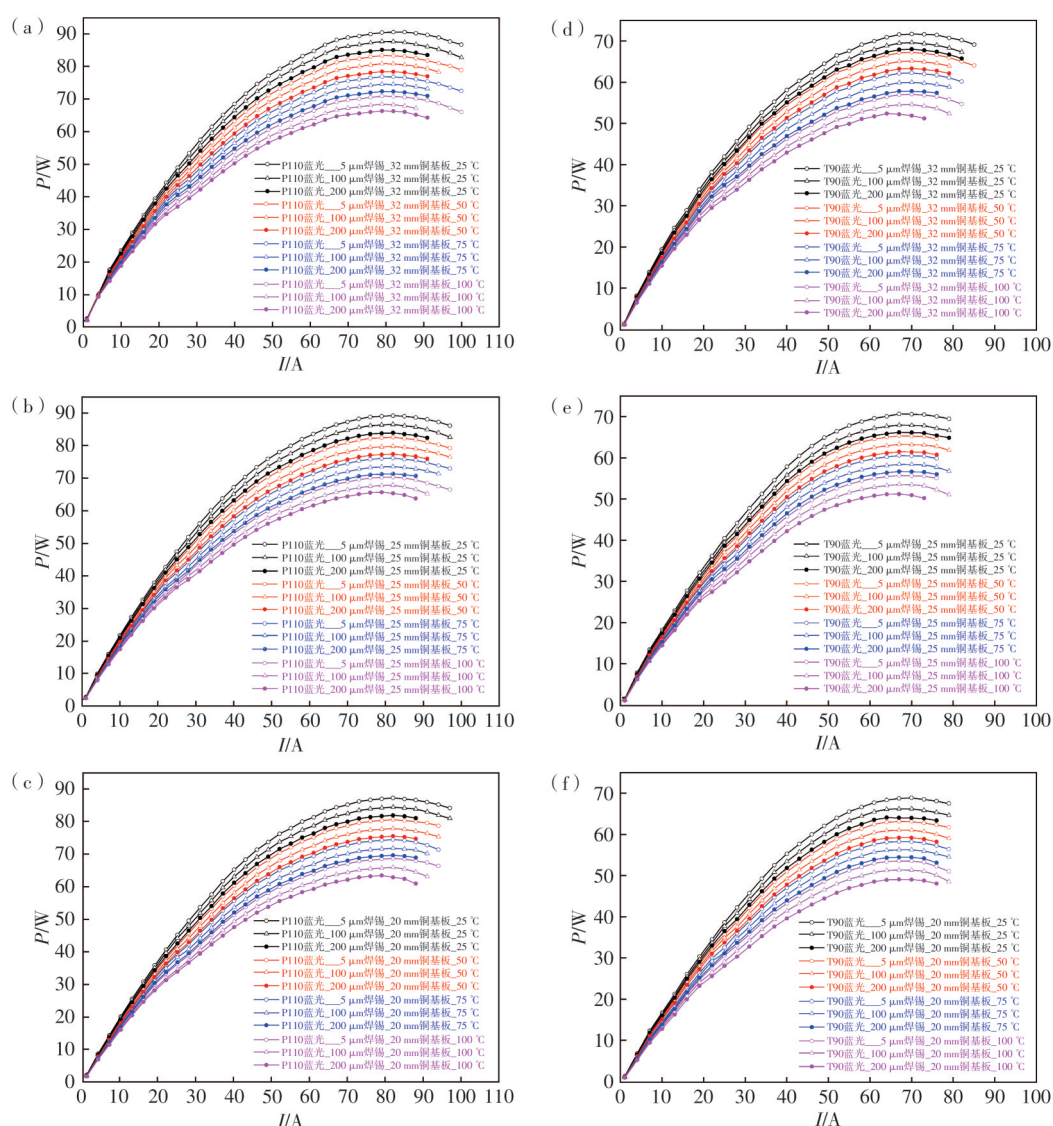


图4 蓝光器件变温 I - L 曲线对比。(a)焊 32 mm 铜基板的 P110 蓝光器件变温 I - L 对比;(b)焊 25 mm 铜基板的 P110 蓝光器件 I - L 对比;(c)焊 20 mm 铜基板的 P110 蓝光器件 I - L 对比;(d)焊 32 mm 铜基板的 T90 蓝光器件 I - L 对比;(e)焊 25 mm 铜基板的 T90 蓝光器件 I - L 对比;(f)焊 20 mm 铜基板的 T90 蓝光器件 I - L 对比

Fig. 4 The comparison of the blue light LED I - L curves at different temperature. (a)The comparison of I - L curves of the P110 blue light LED soldered on a 32 mm copper substrate. (b)The comparison of I - L curves of the P110 blue light LED soldered on a 25 mm copper substrate. (c)The comparison of I - L curves of the P110 blue light LED soldered on a 20 mm copper substrate. (d)The comparison of I - L curves of the T90 blue light LED soldered on a 32 mm copper substrate. (e) The comparison of I - L curves of T90 blue light LED soldered on a 25 mm copper substrate. (f) The comparison of I - L curves of the T90 blue light LED soldered on a 20 mm copper substrate

的线性关系比 100 μm 和 200 μm 焊锡厚度明显。焊锡厚度为 100 μm 时,散热器温度从室温升到 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,其光功率的下降斜率与 50 $^{\circ}\text{C}$ 、75 $^{\circ}\text{C}$ 和 100 $^{\circ}\text{C}$ 之间的斜率不同,焊锡厚度为 200 μm 时,其程度更轻微;(3)4 个温度均是 32 mm 基板与 25 mm 基板的极限光功率之差稍小于 25 mm 基板与 20 mm 基板的极限光功率之差。

尽管本文所用焊锡为高热导率焊锡,然而其

热导率仅为 0.2 W/(cm $\cdot$ K),该热导率低于铜基板基材和铜箔的热导率 4 W/(cm $\cdot$ K),因此焊锡就成了 LED 器件与铜基板之间的一个热阻。当焊锡厚度增加时,焊锡的热阻增加,LED 器件温度升高,热光损加剧从而发光效率下降,这就导致了 200 μm 焊锡厚度样品其 LED 极限光功率低于 100 μm 和 5 μm 焊锡厚度的样品。从图 3 和图 4 的 I - L 曲线可以看出,当 LED 器件工作电流较小

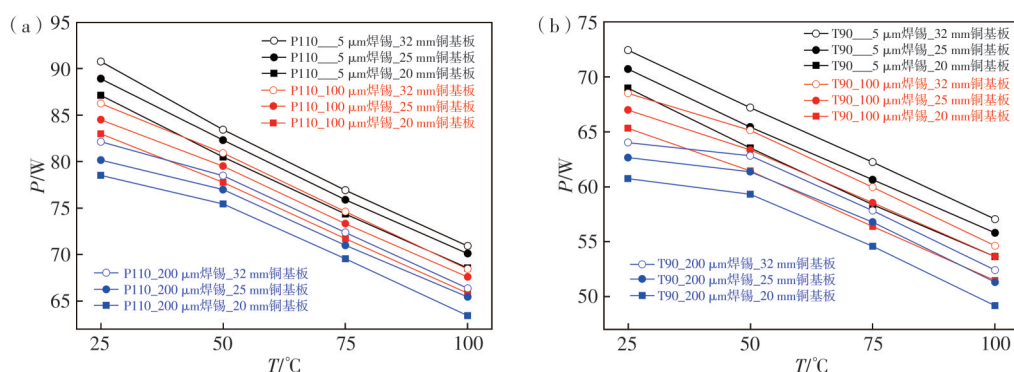


图5 蓝光器件不同温度的极限光功率。(a)P110蓝光器件极限光功率;(b)T90蓝光器件极限光功率

Fig. 5 The maximum optical power of the blue LED at different temperature. (a)The maximum optical power of the P110 blue light LED. (b)The maximum optical power of the T90 blue light LED

时,LED发光时产生的热量也相应比较小,此时焊锡厚度对光强的影响较小,这可能是以往焊锡厚度对LED器件发光性能的影响没有引起重视而鲜有报道的原因所在。近几年,高功率密度LED已经实现量产并已在众多应用场景获得应用,一颗LED器件的功率就能达到几百瓦,此时焊锡厚度对LED器件发光性能将产生显著影响。

本文极限光功率最高的样品是5 μm 焊锡厚度的样品,是手工焊接LED时,焊锡处于熔化状态时施加一定压力然后撤离焊台获得的。在批量化工业生产中,LED器件与金属PCB基板之间的焊接均是先用钢网完成锡膏印刷,然后贴片机贴片LED器件,再经回炉焊后实现LED器件与金属基板的焊接。印刷锡膏的钢网要考虑到刚性、耐磨性及装配等诸多因素,钢网厚度一般为200 μm 左右,因此器件焊接完成后其焊锡厚度也一般为200 μm 左右。目前,不仅LED器件朝着大瓦数高功率密度方向发展,氮化镓和碳化硅电子器件也在朝高功率密度方向发展^[11-13]。因此,发展薄焊锡的贴片和回炉焊技术迫在眉睫,它成为第三代半导体产业进一步发展的重大课题之一。

本文铜基板与散热器之间的连接是在铜基板与散热器之间涂抹热导率为0.08 W/(cm·K)的高导热胶,然后将铜基板推压靠底直至铜基板不能滑动为止,再用螺栓锁紧铜基板与散热器,从而尽量减薄导热胶的厚度降低其热阻,使铜基板的热量能充分传导到紫铜水冷散热器上。从图3~5的数据可知,器件焊接32 mm铜基板与25 mm铜基板时,其极限光功率及 I - L 曲线之间的差值要小于焊25 mm铜基板与20 mm铜基板器件光功率的差值。这说明,铜基板面积增大能起到提高LED器件极限光功率的作用,然而面积进一步加大时,光

功率提高幅度有所减小。本文所用铜基板是热电分离铜凸台基板,器件通电发光时产生的热量主要通过器件背电极面中间PAD传导给铜基板的凸台部分,凸台部分的热量再朝铜基材横向传导并同时透过导热胶传导到散热器。不同面积铜基板,其极限发光功率存在差值,这说明在纵向散热的热通道上,导热胶存在一定热阻,从而会导致热量需要在铜基材上横向传导,当基板面积加大时,其横向散热作用加强,器件温度降低,发光效率提高,从而光功率提高。当基板面积进一步加大时,其横向温度梯度减小,基板增加面积部位与散热器之间的温差变小,导致增加面积部位的纵向导热效果减小,基板从25 mm直径增加到32 mm直径时,其光功率提高幅度小于由20 mm直径增加到25 mm直径时光功率的提高幅度。在应用产品设计和制作时,一般认为在LED点亮并且整灯达到热平衡,铜基板面积增加,整灯光功率不再明显升高,则铜基板面积横向已达到提升光功率的极限。本文两种规格器件在温度较高时,25 mm基板极限光功率均未与32 mm基板基本一致,仅知其差值小于20 mm与25 mm基板之间的差值,其从散热方面提高器件极限功率的极限铜基板面积有待进一步实验验证。在实际应用中,高功率LED器件其极限光功率除了要考虑铜基板面积增大起到的光强增加从而改善 I - L 发光特性外,还需考虑到基板面积增大时导电铜箔面积会相应增大,铜箔线路电阻相应升高,从而引起 I - V 特性改变。因此,基板面积选择方面需要综合考虑其光电特性,而不是仅单纯考虑散热性能一项指标。

当散热器温度由25 $^{\circ}\text{C}$ 升高到50 $^{\circ}\text{C}$,器件极限光功率下降的幅度斜率小于散热器温度由50 $^{\circ}\text{C}$ 升高到100 $^{\circ}\text{C}$ 的斜率,其中200 μm 厚度焊锡样品

的这一规律最为明显。其原因可能是,当散热器温度较低时,LED器件与散热器之间的温度梯度较大,热传导相对较容易,因此随着散热器温度升高,其极限光功率下降幅度较平缓;当散热器温度进一步升高时,LED器件与散热器之间的温度梯度减小,导热速率下降,LED器件温度升高导致极限光功率下降变得明显。对于5 μm 焊锡厚度样品,散热器由25 $^{\circ}\text{C}$ 升高到50 $^{\circ}\text{C}$ 时极限光功率下降斜率与散热器由50 $^{\circ}\text{C}$ 升高到100 $^{\circ}\text{C}$ 时其极限光功率下降斜率相当,这可能是5 μm 焊锡厚度的热阻小于其他两个焊锡厚度,LED器件与散热器之间的温度梯度小于其他两个焊锡厚度,LED器件温度与散热器温度关联性更强,因此表现为其极限光功率随温度下降的幅度线性更强。100 μm 与

200 μm 焊锡厚度的样品其线性规律的不同也是由于焊锡厚度不同,从而热阻不同导致LED器件温度随散热器温度变化不同所致。另一方面,焊锡厚度越厚,热阻越大,室温时其极限光功率越低,这也是低温段极限光功率随温度升高而下降显得平坦的因素之一。

3.2 蓝光样品 I - V 特性

图6是P110和T90两种规格LED蓝光器件在水冷散热器温度为室温25 $^{\circ}\text{C}$ 时的 I - V 伏安特性曲线,图7是两种规格LED蓝光器件的变温 I - V 曲线图。电压读数取值是铜基板正负焊点之间的电压,是完成铜基板焊接导线并安装样品及测试完 I - L 曲线后,用电压表测试的电压值,电流为恒流电源自带的电流表读数。

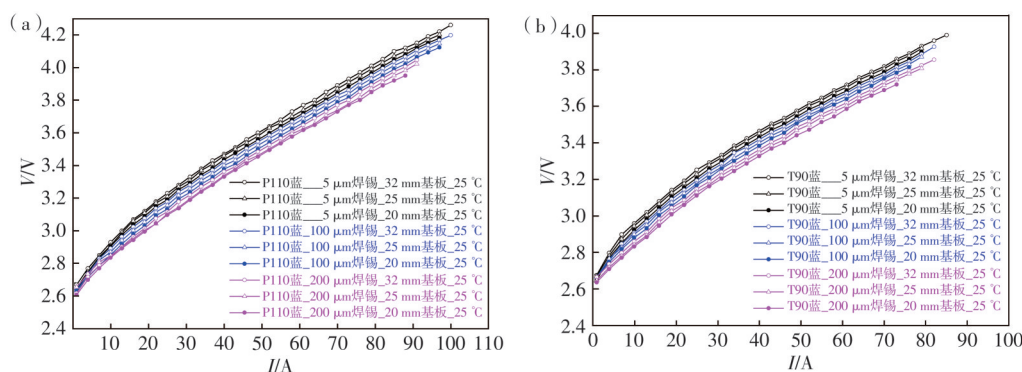


图6 蓝光器件室温 I - V 曲线对比。(a)P110蓝光器件的室温 I - V 对比;(b)T90蓝光器件的室温 I - V 对比

Fig. 6 The comparison of room temperature I - V curves of the blue LED. (a)The comparison of room temperature I - V curves of the P110 blue light LED. (b)The comparison of room temperature I - V curves of the T90 blue light LED

对于LED灯具应用产品,电源驱动方案是应用产品设计的重要环节,尤其是离网照明的高功率密度LED应用产品,由于器件的驱动电流特别大,一般采用大功率MOS管PWM调光直驱方案,应用产品的极限最大电流由锂离子电池内阻、LED器件、铜基板及线路内阻决定。因此,铜基板导线焊点之间的电压对于应用产品设计而言显得尤为重要,它决定着高功率密度器件在应用产品中的极限光强,也决定了锂离子电池组储电量的设计及应用产品放电周期设计等诸多方面。在LED处于替代照明产业发展阶段,由于LED器件处在零点几瓦或几瓦的功率状态工作,工作电流小,此时LED金属基板及焊锡厚度等因素对灯板焊点之间 I - V 特性的影响并未引起注意和专门研究,因此鲜有这方面的报道。

从图6和图7可以看出:(1)焊锡厚度和铜基板面积对室温和变温 I - V 曲线均有明显影响;(2)散热

器为室温25 $^{\circ}\text{C}$ 时,焊锡厚度越薄,LED铜基板焊点之间的电压越高,铜基板面积越大,LED的电压越高;(3)焊锡厚度对LED灯板电压的影响比铜基板面积对电压的影响明显;(4)当散热器温度升高时,不同温度之间的LED灯板电压存在明显差异。P110器件焊32 mm基板在LED极限光功率对应的电流80 A时,其最大电压与最低电压相差0.7 V,25 mm基板时相差0.5 V,20 mm基板时相差0.45 V。T90器件的 I - V 特性也同样具有明显差异。

LED器件的 I - V 特性具有负温度系数特性,其工作电压会随器件温度的升高而下降^[14-16]。当焊锡厚度增加时,焊锡的热阻效应增加,LED器件通电工作时的温度升高,电压负温度效应加强,从而就导致了焊锡厚度增加LED灯板电压下降的现象。

当散热器温度升高时,LED器件与散热器之

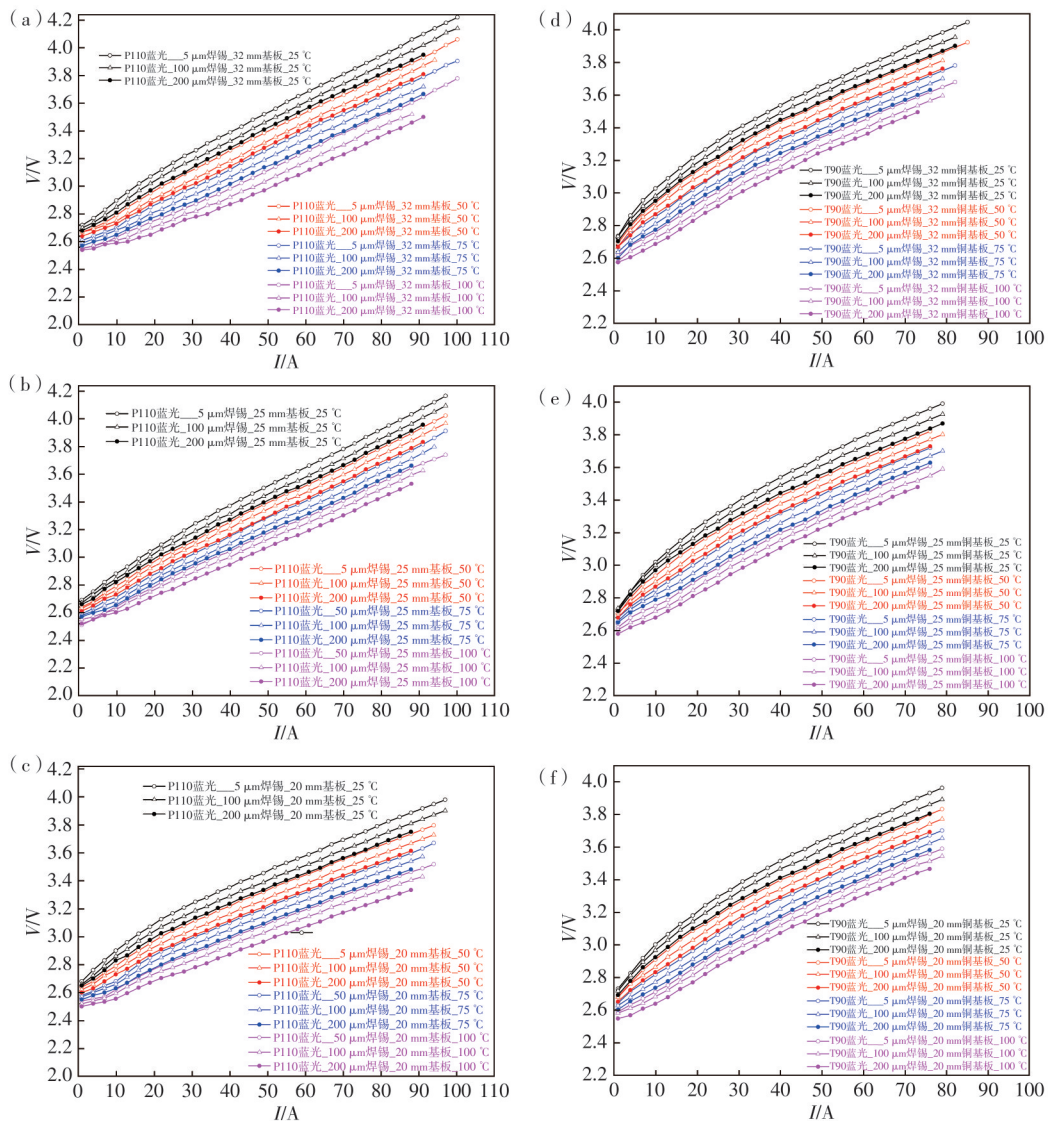


图7 蓝光器件变温 I - V 曲线对比。(a)焊 32 mm 铜基板的 P110 蓝光器件变温 I - V 对比;(b)焊 25 mm 铜基板的 P110 蓝光器件 I - V 对比;(c)焊 20 mm 铜基板的 P110 蓝光器件 I - V 对比;(d)焊 32 mm 铜基板的 T90 蓝光器件 I - V 对比;(e)焊 25 mm 铜基板的 T90 蓝光器件 I - V 对比;(f)焊 20 mm 铜基板的 T90 蓝光器件 I - V 对比

Fig. 7 The comparison of the blue light LED I - V curves at different temperature. (a)The comparison of I - V curves of the P110 blue light LED soldered on a 32 mm copper substrate. (b)The comparison of I - V curves of the P110 blue light LED soldered on a 25 mm copper substrate. (c)The comparison of I - V curves of the P110 blue light LED soldered on a 20 mm copper substrate. (d)The comparison of I - V curves of the T90 blue light LED soldered on a 32 mm copper substrate. (e) The comparison of I - V curves of the T90 blue light LED soldered on a 25 mm copper substrate. (f) The comparison of I - V curves of the T90 blue light LED soldered on a 20 mm copper substrate

间的温度梯度减小,导热速率下降,LED 器件的自加热效应增强,器件温度升高,温度升高导致 LED 负温度系数效应明显,因此散热器温度越高 LED 灯板电压越低。

铜基板面积增大时,导电铜箔面积也会相应地增大,铜基板导线焊点与 LED 器件背电极之间距离相应增加,从而导致串联电阻升高,因而 LED 灯板焊点间电压升高。同时,铜基板面积增加有

增强散热的作用,它会使得器件温度降低,减弱 LED 器件的电压负温度效应,这就导致了铜基板面积增大 LED 灯板电压升高。

尽管图 6 和图 7 所用铜基板均为超厚的 140 μm 厚度铜箔的铜基板,然而当铜基板面积变化时,仍然引起了 LED 灯板电压的明显变化。为了详细探究铜基板铜箔厚度对 LED 光电特性的影响,本文 3.4 部分进行了专门的探究和讨论。

3.3 白光样品 I - L 特性

除了高功率密度蓝光LED获得广泛应用外,白光高功率LED也获得了广泛应用,因此本文研究了白光LED的极限发光性能。图8是两种规格LED白光器件的室温 I - L 特性,图9是变温 I - L 特

性。从图中可以看出,焊锡厚度和铜基板面积对LED白光器件的光通量均有显著影响,且其变化规律与蓝光器件蓝光功率受焊锡厚度和铜基板面积影响的规律存在诸多相似之处,在此仅对其不同之处给予分析。

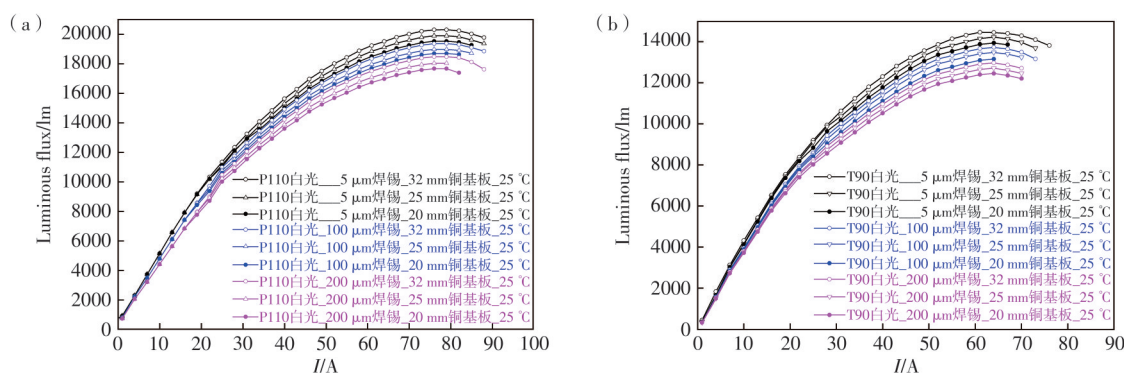


图8 白光器件室温 I - L 曲线对比。(a)P110白光器件的室温 I - L 对比;(b)T90白光器件的室温 I - L 对比

Fig. 8 The comparison of room temperature I - L curves of the white light devices. (a)The comparison of room temperature I - L curves of the P110 white light LED. (b)The comparison of room temperature I - L curves of the T90 white light LED

从图中可以看出:(1)在散热器温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,P110白光LED器件焊在 20 mm 铜基板上 $200\text{ }\mu\text{m}$ 焊锡厚度情况下,其极限光通量是器件焊在 32 mm 铜基板 $5\text{ }\mu\text{m}$ 焊锡厚度情况下的 81% ,而蓝光器件这一数值为 87% ,也即焊锡厚度和铜基板面积两个因素对白光器件极限光通量的影响程度明显大于蓝光器件。T90白光LED器件也呈现相似情况,但其变化幅度稍小于P110白光LED器件。(2)对比图4和图9,当散热器温度、焊锡厚度、铜基板面积变化时,蓝光器件的光饱和电流也即极限发光电流变化幅度较小,而白光器件的极限发光电流具有明显变化,尤其是散热器温度变化引起的极限发光电流变化最为明显。T90白光器件极限电流的变化幅度小于P110器件极限发光电流的变化幅度。

LED白光器件发出的白光是LED蓝光芯片发出的蓝光和蓝光激发荧光粉发出的黄光混合而成的,是LED蓝光芯片电致发蓝光与荧光粉光致发黄光两种发光体发出的光。LED蓝光芯片电致发光时,发光发热同时进行,随着输入电流的加大会导致电子空穴的非辐射复合几率升高,电光转换效率下降,发热功率增加,在达到光饱和前随着输入电流的增加蓝光光功率和蓝光芯片的发热功率会同时升高^[17-21]。当器件电流加大,蓝光光功率升高,荧光粉受蓝光激发的光激发密度升高,荧光粉的发光量子效率下降,非辐射复合几率提高,荧

光粉发热功率增加^[17-21]。因此,LED白光器件通电工作时,其两个发光体也是两个发热体,发光发热同时进行,且相互影响。因此,LED白光器件通电发光时,LED蓝光芯片的发热与荧光粉发热的叠加作用会导致蓝光芯片在相同电流时承受比蓝光器件更高的温度,从而导致其极限发光电流减小。因T90器件的极限发光的电功率小于P110器件,其荧光受到的蓝光激发功率也相应小于P110器件,因此其荧光粉发热功率小于P110器件,蓝光芯片的发热与荧光粉发热的叠加也相应小于P110白光器件,这就表现为T90白光器件的极限发光电流的变化幅度没有P110白光器件明显。LED白光器件的荧光粉受蓝光激发而发生光致发光,也会存在蓝光激发密度大到一定程度时其光致发光不再增加的现象,即荧光粉发光也存在光饱和^[22-24]。由于白光器件的光通量的饱和是蓝光芯片发光和荧光粉发光叠加表现出来的饱和,目前普遍认为,白光器件的光饱和是荧光粉发光先饱和、蓝光芯片发光后饱和^[22-24],这也就表现为LED白光器件极限发光电流减小。随着高功率密度白光LED的应用需求越来越广泛,与之相配套的能耐受高功率密度蓝光激发的荧光粉、荧光玻璃和荧光陶瓷成为了重要研究课题,并有望使高功率密度白光LED的极限光通量获得更大幅度的提高^[25-26]。焊锡厚度、铜基板面积和散热器温度对白光 I - V 曲线均有明显影响,呈现出与蓝光器件

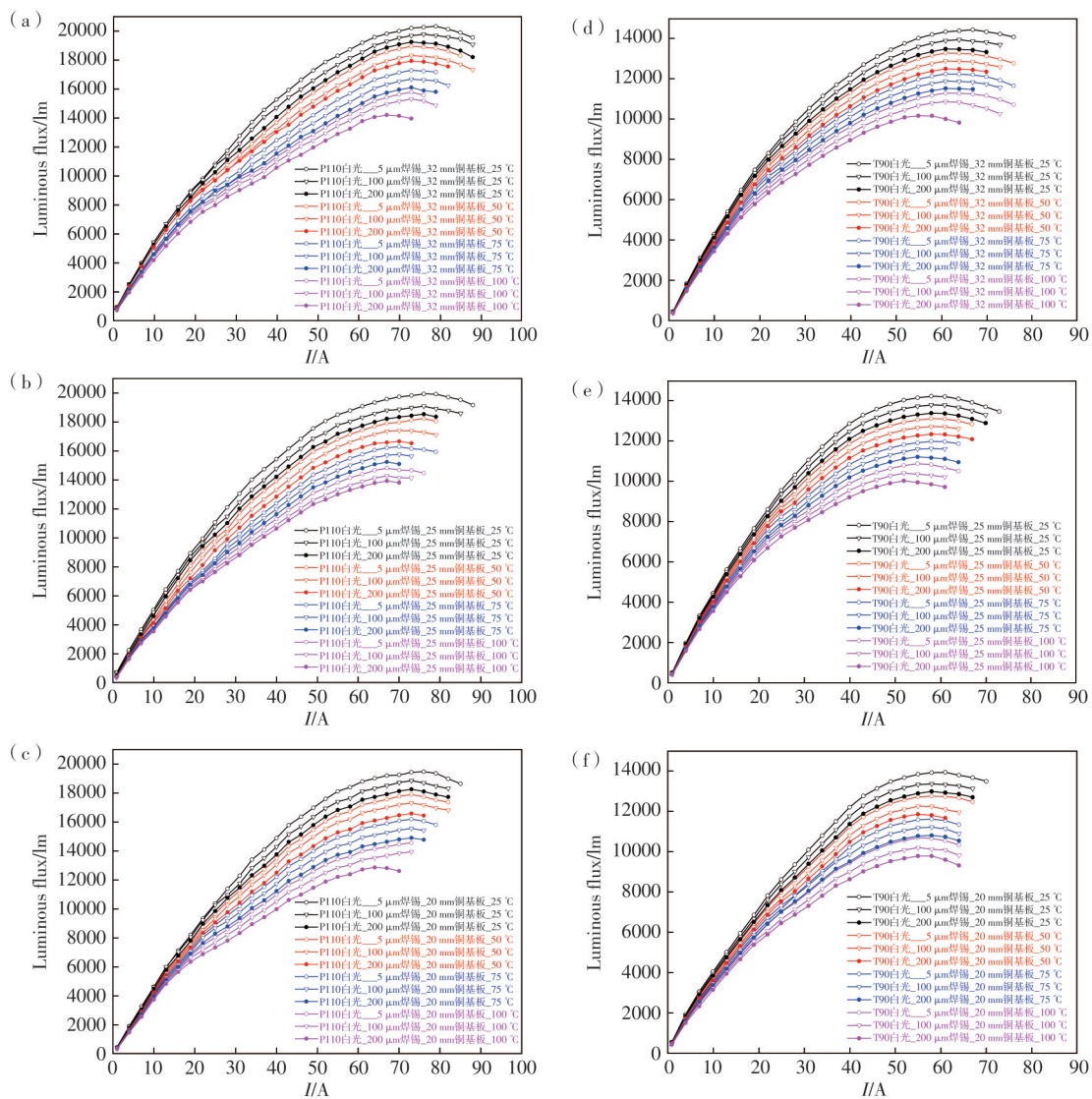


图9 白光器件变温 I - L 曲线对比。(a)焊 32 mm 铜基板的 P110 白光器件变温 I - L 对比;(b)焊 25 mm 铜基板的 P110 白光器件 I - L 对比;(c)焊 20 mm 铜基板的 P110 白光器件 I - L 对比;(d)焊 32 mm 铜基板的 T90 白光器件 I - L 对比;(e)焊 25 mm 铜基板的 T90 白光器件 I - L 对比;(f)焊 20 mm 铜基板的 T90 白光器件 I - L 对比

Fig. 9 The comparison of the white light LED I - L curves at different temperature. (a)The comparison of I - L curves of the P110 white light LED soldered on a 32 mm copper substrate. (b)The comparison of I - L curves of the P110 white light LED soldered on a 25 mm copper substrate. (c)The comparison of I - L curves of the P110 white light LED soldered on a 20 mm copper substrate. (d)The comparison of I - L curves of the T90 white light LED soldered on a 32 mm copper substrate. (e) The comparison of I - L curves of the T90 white light LED soldered on a 25 mm copper substrate. (f)The comparison of I - L curves of the T90 white light LED soldered on a 20 mm copper substrate

基本相同的规律,在此不赘述。

3.4 导电铜箔厚度对 LED 光电特性的影响

本文前面的讨论均是基于铜凸台基板导电铜箔厚度为 140 μm 情况下。以往 LED 照明相关的研究主要是关注以省电为目标的替代照明,LED 器件一般为零点几瓦或几瓦,LED 器件承载的电功率和电流均较小,所用金属基板的铜箔厚度并未引发足够关注,几瓦功率的大功率 LED 所用热

电分离铜凸台基板的导电铜箔厚度普遍为 0.8 OZ(28.448 μm)。

近几年,随着高功率密度 LED 器件及其超越照明应用的兴起,一颗 LED 器件就需要承载几百瓦的电功率,尤其是在某些离网照明应用场合,为了驱动电源设计与锂离子电池相匹配及整机成本考虑,往往需要高功率 LED 器件在数十安培或几百安培电流下工作,此时铜基板导电铜箔厚度会

对LED性能产生显著影响。

为了能更深入地理解热电分离铜凸台基板其导电铜箔厚度对高功率密度LED光电性能的影响,本文研究了70 μm 和140 μm 两种不同铜箔厚度对P70规格LED蓝光器件光电性能的影响,实验样品如表2所列。样品铜基板尺寸是20 mm,焊锡厚度5 μm 。图10是两种铜箔厚度的蓝光LED变温*I-V*曲线对比图,图11是其变温*I-L*曲线对比。

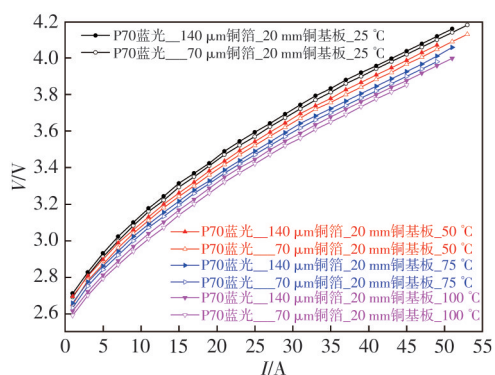


图10 不同导电铜箔厚度的蓝光器件变温*I-V*曲线对比

Fig. 10 The comparison of *I-V* curves of the blue light LEDs at different temperatures when it soldered on the copper substrates with different copper foil thickness

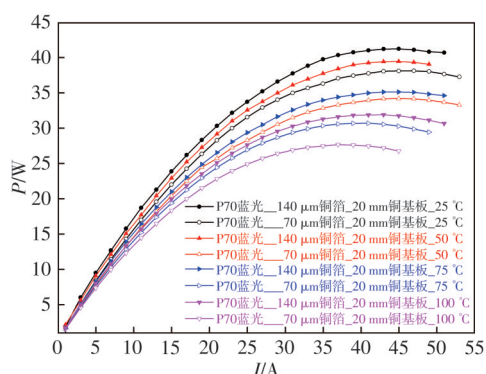


图11 不同导电铜箔厚度的P70蓝光器件的变温*I-L*对比
Fig. 11 The comparison of *I-L* curves of the blue light LEDs at different temperatures when it soldered on the copper substrates with different copper foil thickness

从图10中的*I-V*曲线可以看出,当散热器处于各温度点时,70 μm 铜箔样品各电流的电压均稍低于140 μm 铜箔样品。*I-V*曲线的电压随散热器温度升高而下降的规律性与前面部分关于*I-V*的讨论基本一致。

从图11可以看出,铜箔厚度对LED极限光功率有明显影响。当散热器温度为25 $^{\circ}\text{C}$ 时,70 μm 铜箔样品的极限光功率为38 W,140 μm 铜箔样

品极限光功率为41.5 W,因铜箔厚度增加70 μm 蓝光功率提升了3.5 W,提升幅度为9.2%。当散热器温度为50 $^{\circ}\text{C}$ 和75 $^{\circ}\text{C}$ 时,铜箔厚度增加使极限光功率提升了12.9%;当散热器温度为100 $^{\circ}\text{C}$ 时,铜箔厚度增加使极限光功率提升了16.4%。

从*I-V*曲线可知,在各电流各温度点,均是70 μm 铜箔样品的电压低于140 μm 样品。例如,在给LED通45 A电流时,在各个温度点,70 μm 铜箔样品的电压比140 μm 铜箔样品的电压均要低,25 $^{\circ}\text{C}$ 时低0.018 V,50 $^{\circ}\text{C}$ 时低0.02 V,75 $^{\circ}\text{C}$ 时低0.025 V,100 $^{\circ}\text{C}$ 时低0.025 5 V。

铜基板导线焊点与LED陶瓷封装器件背电极焊点之间的距离是一定的,导电铜箔面积也是固定的,铜箔越薄电阻越大,因此70 μm 铜箔引入的串联电阻会大于140 μm 铜箔引入的串联电阻。串联电阻增大,灯板导线焊点与LED器件焊点之间的串联电压就会越高,假设LED器件的电压保持不变,则相同电流情况下,导电铜箔越薄灯板的电压就会越高。然而,实测数据表明,70 μm 铜箔的灯板其电压反而低于140 μm 铜箔,这说明引起70 μm 铜箔灯板电压下降的原因来自于LED器件电压的下降。引起LED器件电压下降的原因来自于LED电压的负温度系数的特性,可能是由于70 μm 铜箔灯板上的LED器件温度高于140 μm 铜箔灯板上的器件,当70 μm 铜箔电阻增大引起的电压升高小于铜箔变薄导致器件温度升高引起的电压下降时,就会表现为70 μm 铜箔厚度灯板的电压低于140 μm 铜箔灯板的样品。这说明,对于热电分离铜凸台基板,尽管铜凸台部位对导热起主要作用,但导电铜箔也能起到一定导热作用,且铜箔越厚其导热能力越强。

图11中,在各温度点均是140 μm 铜箔样品其LED的光功率大于70 μm 铜箔样品。70 μm 铜箔与140 μm 铜箔在引起电压发生变化时,存在竞争关系,当铜箔变薄引起的电压升高作用小于其导热变差引起LED器件温度升高导致电压降低时,就会表现为电压降低。而在光功率方面,导电铜箔变薄引起的光强下降则是加和作用:一方面,导电铜箔变薄其横向导热能力变差,会引起LED器件温度升高,从而引起LED的热光损加剧,表现为光功率下降;另一方面,导电铜箔变薄,其电阻变大,大电流导通流过铜箔时,铜箔电阻的自加热效应增加,散热能力变差,这也会加剧LED的

热光损并表现为光功率下降。不同铜箔厚度 LED 样品的 I - L 结果也印证了 I - V 特性的结果和导致原因。

LED 的热电分离铜凸台基板, 尽管铜箔的主要作用是导电, 铜凸台的主要作用是导热, 然而当所用 LED 器件为高功率器件时, 铜箔对 LED 的光学特性和电学特性均会产生明显影响。

4 结 论

为了探究热电分离铜凸台 PCB 基板的面积、LED 器件与铜基板之间的焊锡厚度、导电铜箔厚度对高功率密度 LED 器件极限光电性能的影响, 本文将单颗极限电功率为 300 W 和 200 W 的两种规格的 LED 蓝光和白光器件, 分三个焊锡厚度, 分别贴片焊接在三种不同面积的热电分离铜凸台基板上, 测试了当散热器温度不同时的蓝光 LED 器件光功率、白光 LED 光通量及其灯板导线焊点间的电压随电流的变化。同时, 还研究了两种不同铜基板导电铜箔厚度在极限电功率为 150 W 的蓝光 LED 器件的 I - L 特性和 I - V 特性, 并对其极限发光进行了研究。研究结论为: 焊锡厚度、铜基板面积和导电铜箔的厚度均会对 LED 的极限发光强度和工作电压产生明显影响; 减小焊锡厚度和增加铜基板面积均能显著提高高功率 LED 器件的极限光强, 当散热器温度为室温时, P110 蓝光

LED 器件焊锡厚度由 200 μm 减小到 5 μm , 铜基板直径由 20 mm 增加到 32 mm 时, 蓝光极限光功率可以提升 16%, T90 器件提升 19%, 两种规格白光 LED 极限光通量的提升均为 15% 左右; 焊锡厚度越薄, LED 铜基板焊点之间的电压越高, 铜基板面积越大, LED 的电压越高; 焊锡厚度对 LED 灯板电压的影响比铜基板面积对电压的影响明显, P110 器件焊 32 mm 基板在 LED 极限光功率对应的电流 80 A 时, 其最大电压与最低电压相差 0.7 V, 25 mm 基板时相差 0.5 V, 20 mm 基板时相差 0.45 V; 当散热器温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 时, 因铜箔厚度增加 70 μm 蓝光功率提升幅度为 9.2%, 当散热器温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 和 75 $^{\circ}\text{C}$ 时, 铜箔厚度增加使极限光功率提升了 12.9%, 当散热器温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 时, 铜箔厚度增加使极限光功率提升了 16.4%。为了使高功率密度 LED 器件在“超越照明”领域获得更为广泛的应用, 发展适合规模化生产的薄焊锡贴片和焊接技术、开发高热导率可焊性强的焊料以及制造更厚铜箔的铜基板是目前面临的重大课题。本研究可为高功率密度 LED 器件及其应用研究提供一定的实验和数据支撑。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240090>.

参 考 文 献:

- [1] 李晋闯, 刘志强, 魏同波, 等. 中国半导体照明发展综述 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0116002.
 LI J M, LIU Z Q, WEI T B, *et al.* Development summary of semiconductor lighting in China [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2021, 41(1): 0116002. (in Chinese)
- [2] 江风益, 刘军林, 张建立, 等. 半导体黄光发光二极管新材料新器件新设备 [J]. 物理学报, 2019, 68(16): 168503.
 JIANG F Y, LIU J L, ZHANG J L, *et al.* Semiconductor yellow light-emitting diodes [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2019, 68(16): 168503. (in Chinese)
- [3] 江风益, 刘军林, 王立, 等. 硅衬底高光效 GaN 基蓝色发光二极管 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45(6): 067302.
 JIANG F Y, LIU J L, WANG L, *et al.* High optical efficiency GaN based blue LED on silicon substrate [J]. *Sci. Sinica Phys., Mech. Astron.*, 2015, 45(6): 067302. (in Chinese)
- [4] LIU M N, LI W Y, CHEN W, *et al.* Junction temperature and luminous flux prediction for white LED array based on electrical-photo-thermal modeling [J]. *Case Stud. Therm. Eng.*, 2024, 54: 103940.
- [5] 余兴建, 舒伟程, 胡润, 等. 高出光品质 LED 封装: 现状及进展 [J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(9): 891-922.
 YU X J, SHU W C, HU R, *et al.* LED packaging for high light quality: status and perspectives [J]. *Sci. Sinica Technol.*, 2017, 47(9): 891-922. (in Chinese)

- [6] 李晓珍,熊传兵,汤英文,等. 大功率倒装LED芯片陶瓷封装器件顶面微区发光均匀性[J]. 发光学报, 2021, 42(9): 1436-1445.
- LI X Z, XIONG C B, TANG Y W, *et al.* Uniformity of light emission in micro-area on mesa of high-power flip-chip LED devices with ceramic packaging [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(9): 1436-1445. (in Chinese)
- [7] 王世龙,熊传兵,汤英文,等. 共晶芯片数及芯片位置对陶瓷共晶封装LED发光性能的影响[J]. 发光学报, 2020, 41(11): 1421-1430.
- WANG S L, XIONG C B, TANG Y W, *et al.* Effect of number and location of eutectic chips on luminescent properties of ceramic eutectic packaged LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(11): 1421-1430. (in Chinese)
- [8] 刘倩,熊传兵,汤英文,等. 多芯CSP-LED芯片间距对热拥堵的影响[J]. 发光学报, 2020, 41(3): 308-315.
- LIU Q, XIONG C B, TANG Y W, *et al.* Influence of multi-core CSP-LED chip spacing on thermal congestion [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(3): 308-315. (in Chinese)
- [9] 王哲,王永通,刘佳欣,等. 内嵌陶瓷电路板的PCB基板制备及其LED封装性能[J]. 发光学报, 2022, 43(7): 1139-1146.
- WANG Z, WANG Y T, LIU J X, *et al.* Preparation of PCB substrate embedded with ceramic circuit board and performance of LED packaging [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(7): 1139-1146. (in Chinese)
- [10] 张稀雯,余子康,牟运,等. 荧光玻璃封装芯片级白光LED光热性能[J]. 发光学报, 2021, 42(12): 1961-1968.
- ZHANG X W, YU Z K, MOU Y, *et al.* Photothermal performance of phosphor-in-glass packaged chip-scale white LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(12): 1961-1968. (in Chinese)
- [11] KE W C, CHIANG C Y, PETER LIN Y J, *et al.* Improved wavelength stability and heat dissipation of InGaN-based light-emitting diodes using a graphene interlayer on patterned sapphire substrate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 122(20): 203501.
- [12] YAO Y X, ZHANG Y C, ZHU J D, *et al.* Study of the AlPN/GaN high electron mobility transistors with improved transconductance linearity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 123(20): 202104.
- [13] NG Y H, ZHENG Z Y, ZHANG L, *et al.* p-GaN gate power HEMT heterostructure as a versatile platform for extremely wide-temperature-range (X-WTR) applications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(4): 043504.
- [14] KONG Y F, LI X, MEI Y H, *et al.* Effects of die-attach material and ambient temperature on properties of high-power COB blue LED module [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2015, 62(7): 2251-2256.
- [15] MEYAARD D S, CHO J, FRED SCHUBERT E, *et al.* Analysis of the temperature dependence of the forward voltage characteristics of GaInN light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(12): 121103.
- [16] QUITSCH W A, SAGER D, LOEWENICH M, *et al.* Low injection losses in InGaN/GaN LEDs: the correlation of photoluminescence, electroluminescence, and photocurrent measurements [J]. *J. Appl. Phys.*, 2018, 123(21): 214502.
- [17] XIAO Y, HAO Z D, ZHANG L L, *et al.* An efficient blue phosphor $\text{Ba}_2\text{Lu}_5\text{B}_5\text{O}_{17}:\text{Ce}^{3+}$ stabilized by La_2O_3 : photoluminescence properties and potential use in white LEDs [J]. *Dyes Pigments*, 2018, 154: 121-127.
- [18] WU H J, HAO Z D, PAN G H, *et al.* Phosphor- SiO_2 composite films suitable for white laser lighting with excellent color rendering [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2020, 40(6): 2439-2444.
- [19] XIAO Y, HAO Z D, ZHANG L L, *et al.* Highly efficient green-emitting phosphors $\text{Ba}_2\text{Y}_5\text{B}_5\text{O}_{17}$ with low thermal quenching due to fast energy transfer from Ce^{3+} to Tb^{3+} [J]. *Inorg. Chem.*, 2017, 56(8): 4538-4544.
- [20] WU H J, PAN G H, HAO Z D, *et al.* Highly efficient and thermally robust cyan-green phosphor-in-glass films for high-brightness laser lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(36): 12342-12352.
- [21] 张亮亮,张家骅,郝振东,等. Cr^{3+} 掺杂的宽带近红外荧光粉及其研究进展[J]. 发光学报, 2019, 40(12): 1449-1459.
- ZHANG L L, ZHANG J H, HAO Z D, *et al.* Recent progress on Cr^{3+} doped broad band NIR phosphors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(12): 1449-1459. (in Chinese)
- [22] CHEN Q, MA Y P, YU X J, *et al.* Phosphor temperature overestimation in high-power light-emitting diode by thermocouple [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2017, 64(2): 463-466.
- [23] ZHANG X G, SUN Z S, ZHU Z, *et al.* High-efficient, spherical and thermal-stable carbon dots@silica fluorescent composite as rare earth-free phosphors for white LED [J]. *Ceram. Int.*, 2020, 46(10): 14706-14712.
- [24] LI Y B, MA C Y, ZUO C D, *et al.* High thermal stability AlN-YAG:Ce composite phosphor ceramics for high-power

- laser-driven lighting [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 119(25): 251903.
- [25] HU T, NING L X, GAO Y, *et al.* Glass crystallization making red phosphor for high-power warm white lighting [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 56.
- [26] AN J X, ZHANG S, LIU R W, *et al.* Luminescent properties of Dy³⁺/Eu³⁺ doped fluorescent glass for white LED based on oxyfluoride matrix [J]. *J. Rare Earths*, 2021, 39(1): 26-32.



黄林凤(1996-),女,广西梧州人,硕士研究生,2021年于玉林师范学院获得学士学位,主要从事半导体发光器件的研究。

E-mail: 2379548661@qq.com



熊传兵(1973-),男,江西南昌人,博士,教授,2008年于南昌大学获得博士学位,主要从事LED和半导体激光器的研究。

E-mail: chuanbingxiong@126.com