



多芯CSP-LED芯片间距对热拥堵的影响

刘倩, 熊传兵, 汤英文, 李晓珍, 王世龙

引用本文:

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 Qian, XIONG Chuan-bing, TANG Ying-wen, et al. Influence of Multi-core CSP-LED Chip Spacing on Thermal Congestion[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(3): 308-315.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204103.0308>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于PWM调光的高显色性白光LED混光优化方法

Optimization Dimming Method of Mixed Light for White Light Emitting Diode with High Color Rendering Index Based on Pulse Width Modulation

发光学报. 2019, 40(12): 1538-1545 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194012.1538>

电-热应力对GaN基白光LED可靠性的影响

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

发光学报. 2016, 37(1): 124-129 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163701.0124>

基于静电纺丝工艺的LED远程荧光片制备技术

Fabrication Technology of LED Remote Fluorescent Sheets Based on Electrostatic Spinning Process

发光学报. 2016, 37(5): 567-572 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163705.0567>

GaN基垂直结构LED的n型电极结构设计及芯片制备

n-type Electrode Patterns Design and Device Fabrication of GaN-based Vertical Structure LEDs

发光学报. 2016, 37(3): 338-345 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163703.0338>

光量子体系下基于粒子群算法的LED植物照明光源设计

Design of LED Plant Lighting Source Based on Particle Swarm Optimization Algorithm Under Photons System

发光学报. 2019, 40(3): 340-348 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194003.0340>

文章编号: 1000-7032(2020)03-0308-08

多芯 CSP-LED 芯片间距对热拥堵的影响

刘 倩, 熊传兵*, 汤英文, 李晓珍, 王世龙

(闽南师范大学 物理与信息工程学院, 福建 漳州 363000)

摘要: 在铝基板上贴片了不同间距的四颗芯片级封装发光二极管(CSP-LED)模组,测试了不同贴片间距 CSP-LED 模组的 EL 光谱、流明效率、光通量、相关色温等光电参数。结果显示,在小电流(20~400 mA)下,随着注入电流的增大,不同排布间距的蓝、白光样品的光电性能基本呈现相同的变化规律,即光通量、光功率呈线性增长,光效基本保持稳定;在大电流(1~1.5 A)下,随着芯片间排布间距减小,EL 光谱积分强度降低,色温升高,红色比下降,排布间距为 0.2 mm 的光通量衰减了 84.58%,相比之下排布间距为 3 mm 和 5 mm 的光通量衰减明显减缓,分别为 8.96% 和 3.58%,这些现象与禁带宽度、热应力、非辐射复合等因素有关。结果表明,CSP 白光 LED 光通量衰减主要是荧光粉退化导致的,考虑到实际生产成本问题,排布间距为 3 mm 时,有利于热量散出,进而提高 LED 光电性能特性及其自身的使用寿命。

关键词: 芯片级封装; 发光二极管; 热拥堵; 排布间距

中图分类号: TN304

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20204103.0308

Influence of Multi-core CSP-LED Chip Spacing on Thermal Congestion

LIU Qian, XIONG Chuan-bing*, TANG Ying-wen, LI Xiao-zhen, WANG Shi-long

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

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

Abstract: Four chip-scale packaged light-emitting diode (CSP-LED) modules with different pitches were mounted on an aluminum substrate. The EL spectrum, lumen efficiency, luminous flux, correlated color temperature and other photoelectric parameters of CSP-LED modules with different patch pitches are measured. The results show that under low current (20~400 mA), with the increase of the injection current, the photoelectric properties of blue and white light samples with different arrangement intervals basically show the same change law. It is like that the luminous flux and optical power increase linearly, and the optical efficiency is basically stable. Under high current (1~1.5 A), as the arrangement spacing between chips decreases, the integrated intensity of the EL spectrum decreases, the color temperature increases, the red ratio decreases, and the luminous flux with an arrangement spacing of 0.2 mm attenuated by 84.58%. In contrast, the attenuation of luminous flux at 3 mm and 5 mm arrangement spacing is significantly slowed down, 8.96% and 3.58%, respectively. These phenomena are related to factors such as the forbidden band width, thermal stress, and non-radiative recombination. The results show that the main reason for the attenuation of CSP white LED light flux is the degradation of phosphors. Considering the actual production cost, when the spacing is 3 mm, it is conducive to heat dissipation, thereby improving the LED photoelectric

收稿日期: 2019-12-12; 修订日期: 2020-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(51072076); 福建省科技厅产学研合作项目(2018H6015); 福建省高校创新团队培育计划(201821)资助项目 Supported by National Natural Science Foundation of China(51072076); Industry-University Cooperation Project of Fujian Provincial Department of Science and Technology(2018H6015); Cultivation Program for Innovation Team in University of Fujian Province(201821)

performance characteristics and its own service life.

Key words: chip-scale packaged(CSP); light-emitting diode(LED); thermal congestion; layout structure

1 引言

LED是一种典型的节能、环保的绿色照明光源^[1]。但是,LED的使用效果仍受到封装形式、生产材料以及应用环境等因素的影响,虽然它具有低发热量的优点,但是在使用过程中产生的热量对生产器件的局限性仍需要进一步的完善。根据行业发展所需,在1994年由日本三菱公司提出了一种新型的芯片级封装(简称CSP)形式^[2],由于CSP封装器件出光面为五面光的体光源,且具有体积小、重量轻、色彩饱和度高、色域较宽、高效低耗、寿命长、节能环保的特点,因此很快便广泛地应用于器件的生产中。经过短暂的几年时间,它已成为了集成电路中重要的封装形式。同时,LED也正在向着微型化的趋势发展,因此在2012年左右,CSP倒装芯片的封装技术逐步被引用到LED封装行业,形成了当今的CSP-LED器件^[3]。

自2015年7月三星公司发布LM131ALED封装芯片^[4]采用了CSP技术以来,很快飞利浦公司就推出了五面发光的CSP封装的WHITE系列产品^[5],韩国首尔半导体公司在同年9月发布了WICOP2系列产品^[6]。经过多年的LED发展历程,这次芯片级封装的重大改革使得电路板上的LED的组装密度有了极大的提高。因此,CSP-LED产品很快便应用于背光源和汽车前照灯光源^[7-8],这一变革使得汽车照明和液晶行业有了蓬勃的发展。但由于大功率LED芯片尺寸较小,发光光谱较窄,且不含红外波段,所以产生的热量基本不能通过热辐射的方式散发出去^[9]。因此相比于传统的卤素灯和氙气灯,局部热流密度较大,特别是对于由多个LED光源模块采用串联或并联的方式密集封装组成的集成光源,这样密集分布的设计必然将会导致电路变得更加复杂并且热量堆积问题更为严重,进而使芯片的光通量降低,发光颜色出现偏差,甚至造成电子元器件设备烧坏或老化,导致芯片使用寿命降低^[10]。因此,采用合理的芯片排布间距设计使LED工作时产生的热量及时导出,对保证其良好的发光效果与

延长使用寿命起着至关重要的作用^[11]。但CSP白光LED芯片的结构布局对器件性能影响方面的研究,尚未有报道。

LED光源主要是由封装基板、芯片和荧光粉组成,通过芯片发出蓝光来激发表面的荧光粉产生黄光,再由蓝光和黄光混合而产生白光^[12]。当前,金属铝基板、金属复合基板和陶瓷基板是LED主要的封装基板源,其中金属铝基板具有优良的加工性能、电学性能和散热性能,因此在LED照明、LED车灯和LED-TV背光源方面具有广泛的应用^[13]。本文通过改变铝基板上四颗串联芯片的排布间距,根据电致发光特性(EL)研究了蓝光和CSP白光LED芯片器件光电性能参数的变化。合理的排布间距对热流密度大所导致的热拥堵问题能够有所缓减,同时可以对芯片起到保护作用,从而可获得光色电热综合性能更为优异的光学器件。

2 实验

样品为自制的同批次的合格LED灯珠。LED封装采用三安S-55CBFSD-A芯片、KER3000硅胶和BM302D黄色荧光粉。将具有相同外延结构和芯片制造工艺的四颗芯片以串联的方式焊接在大小为 $2.2\text{ cm} \times 2.2\text{ cm}$ 相同结构的正方形铝基板上,得到排布间距分别为0.2,0.4,0.8,1,2,3,4,5 mm的蓝光LED芯片和CSP白光LED芯片样品(如图1),做了相同的四组样品,以减少实验偶然性误差。

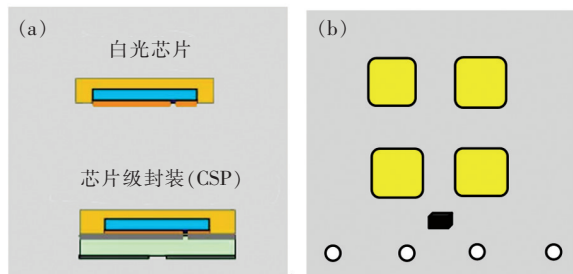


图1 (a)CSP白光LED结构简化图;(b)芯片样品的简化图。

Fig.1 (a)Simplified structure of CSP white LED. (b)Simplified diagram of the chip sample.

本文分别测试了相同结构的蓝、白光两种不同芯片的变电流 EL 谱及光学特性参数。在实验过程中,对蓝、白光 LED 采用电流范围为 10 ~ 1 500 mA 的恒流驱动,在数据采集方面采用远方测试仪测量实验中的 LED 在不同排布间距下的相关光电参数。在测定时,采用远方光谱分析系统在 LED 额定工作电流下进行光电参数测量。本文选择排布间距为 0.2, 0.4, 0.8, 1, 3, 5 mm 的样品中其中一组实验数据进行讨论与分析。

3 结果与讨论

3.1 蓝光和 CSP 白光 LED 芯片自发热对比

图 2 为蓝光 LED 和 CSP 白光 LED 芯片的器件温度-电流变化曲线。温度是影响 LED 结构的重要因素之一,通过热敏电阻测得的芯片基板温度可以很好地反映芯片结温指标。因为都是采用具有相同结构的芯片,所以变化规律都随电流增大呈亚线性升高,只是白光在同一电流变化量下具有较大的器件温度,相比白光而言,蓝光器件温

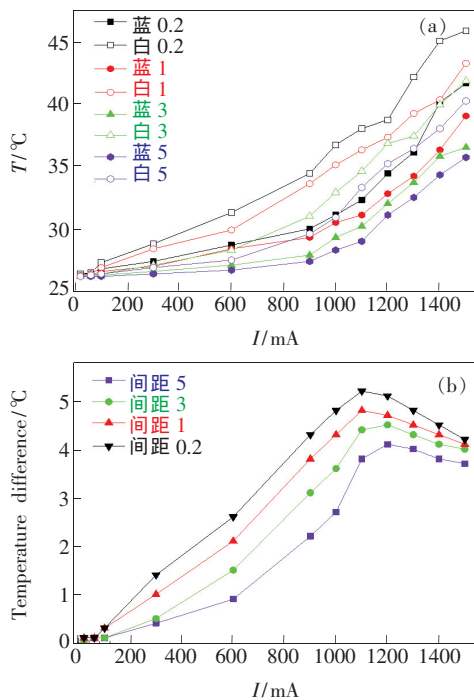


图 2 (a) 不同排布间距下蓝、白光芯片温度变化对比;
(b) 不同排布间距下蓝、白光芯片温度差曲线。

Fig. 2 (a) Comparison chart of the temperature change of blue and white light chips at different arrangement intervals. (b) Graph of the temperature difference between blue and white light chips at different arrangement intervals.

度变化较小。白光芯片是用蓝光 LED 芯片激发 YAG 荧光粉产生黄光,再混合一定比例的蓝光转化为白光,由于荧光粉存在下转换问题,一个蓝光光子的能量就大于一个黄光光子,所以蓝光光子激发相同的黄光光子,便会有多余的能量以热能的形式散出。故相比蓝光而言,白光的器件温度变化会更大。并且随着 LED 排布间距减小,同一电流变化量的情况下,器件温度差更加显著,且随着驱动电流增大,蓝、白光的温度差值随之增大;但是当电流达到极端大电流 1 A 时,温度差变化又逐步趋于下降。我们将这一现象归因于荧光粉的转换效率下降^[14],随着样品排布间距减小,加剧了热量的产生。

3.2 排布间距对蓝、白光芯片光谱的影响

由于密集封装的 LED 芯片多应用于大电流环境下,所以本文选用 1.3 A 恒定电流下蓝、白光光谱对比图(如图 3)进行分析。蓝、白光 LED 样品在 0.2 mm 和 5 mm 不同的排布间距下,对应的峰值波长分别为 457, 453, 462, 455 nm。结果显示,随着排布间距减小,其波长呈现红移现象,且 CSP 白光 LED 光谱红移现象比较明显,蓝、白光的光谱强度分别衰减为原来的 51.5% 和 40.1%,白光的光谱强度随着排布间距减小,衰减现象更

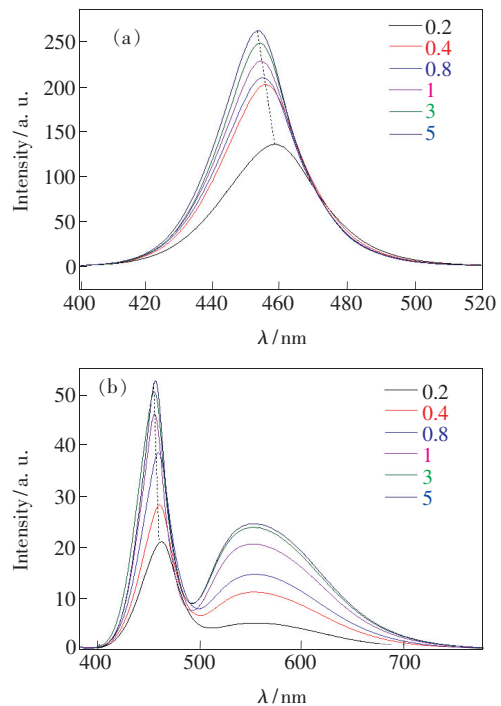


图 3 不同排布间距下蓝(a)、白(b)光光谱对比图。
Fig. 3 Contrast diagrams of blue (a) and white (b) light spectra intensity under different row spacing

加显著。其主要原因是排布间距减小而产生的高温效应会引起电子的运动加剧, 导致产生蓝光的能量降低, 波长增大, 从而出现明显的红移现象; 热效应进一步使荧光粉的非辐射复合增多, 热拥堵效应加剧, 导致荧光粉转化效率降低, 辐射强度下降, 所以黄光光谱强度较蓝光光谱强度减弱^[15-16], 白光光谱强度降低也随排布间距减小而更加明显。

3.3 排布间距对蓝、白光芯片光电性能的影响

图 4 为蓝、白光 LED 芯片在不同排布间距下的正向 $I-V$ 特性曲线。随着正向驱动电流的增加, 实际电路中 PN 结的正向导通电压也随之增大, 在通过 PN 结的正向电流大小变化幅度较大的条件下, 正向电压却能维持在 10 ~ 12 V 之间, 且在 10 ~ 400 mA 之间电压随电流的变化增幅较大, 随后在电流为 400 ~ 1 000 mA 时基本呈线性增长; 当电流增大到 1 A 以上时, 电压的增长趋势减缓。其原因是发光二极管中 PN 结加正向偏压时, 外加电压的方向与自建场的方向相反, 使空间电荷区中的电场减弱。于是, 内电场对电子扩散运动的阻碍减弱, 随着扩散电流加大, PN 结呈现低阻性, 故电压变化趋于平稳。随着电流的增大, CSP 白光 LED 芯片排布间距在 3 mm 以下时, 电

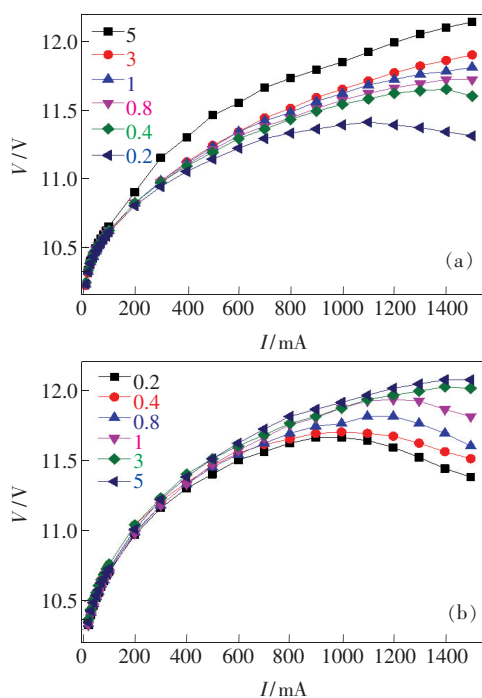


图 4 不同排布间距下蓝(a)、白(b)光 $I-V$ 特性曲线。
Fig. 4 $I-V$ characteristic curves of blue(a) and white(b) light under different arrangement spacing

压呈下降的变化趋势。电压下降是因为 LED 散热不良引起的热效应导致的有源层中热生缺陷增多, 位错密度变大, 漏电流现象加剧, 使载流子注入效率增加, 芯片结构内部的串联电阻均变小, 正向电压降低^[17-18]。

图 5 为蓝光 LED 和 CSP 白光 LED 在不同的排布间距下的光功率与电流关系曲线, 当驱动电流值小于 800 mA 时, 蓝、白光的光功率都呈相对上升的趋势, 但 CSP 白光 LED 的光功率相对较弱。根据白光 LED 的发光原理, 由于荧光粉的转换效率小于 100%, 蓝光激发黄色荧光粉时能量会有损失, 相同电流驱动下, 白光 LED 的光功率比相同结构的蓝光 LED 芯片的光功率值偏小。当驱动电流为 1 A 以上时, 光功率整体呈下降趋势, 蓝、白光在 0.2 mm 时分别降低到最大光功率的 75.28% 和 28.88%。显然, 随着排布间距减小, 白光光功率的衰减更加显著, 主要是因为排布间距减小, 非辐射复合中心的增加使 LED 光功率更容易受到热效应的影响而衰减, 同时 CSP 白光 LED 的 YAG 荧光粉也受热效应的影响而退化引起的。

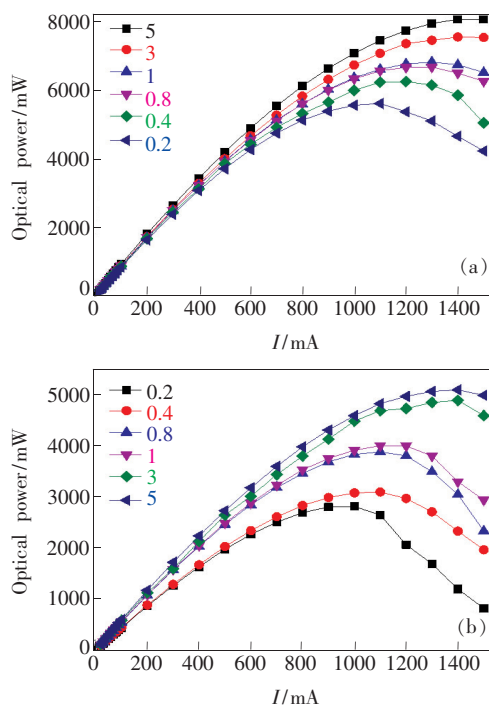


图 5 不同排布间距下蓝(a)、白(b)光变电流的光功率对比图。

Fig. 5 Diagrams showing the comparison of optical power of blue(a) and white(b) light varying currents at different arrangement spacings

光通量是表征光器件的光源质量高低的一个重要指标,是通过人的眼睛对辐射通量的反应程度的物理量。国家照明委员会用平均值法确定了人眼对各种波长的平均相对灵敏度,称为人眼的视见函数。而光通量

$$\varphi = \int e(\lambda)v(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

其中, $e(\lambda)$ 为光谱辐射能通量,也称为辐射功率; $v(\lambda)$ 为人眼的视见函数。

图 6 为变电流条件下的蓝、白光光通量曲线对比图,图中显示:当驱动电流较小时,蓝、白光 LED 具有相似的变化规律,即随着电流增大,光通量基本都呈线性增长;随着正向电流增加到 1 A 以上,蓝光 LED 光通量呈次线性增长,CSP 白光 LED 呈现明显的下降趋势,在 5,3,1,0.8,0.4,0.2 mm 的排布间距下,光通量分别降低为最大光通量的 96.42%、91.04%、61.15%、47.41%、15.42%。表明排布间距越小,光通量下降效果更加显著。这是由于 LED 在大电流密度的驱动下,由于芯片热拥堵效应使 LED 的峰值波长红移,导致蓝光部分的辐射通量与视见函数的积分变大,

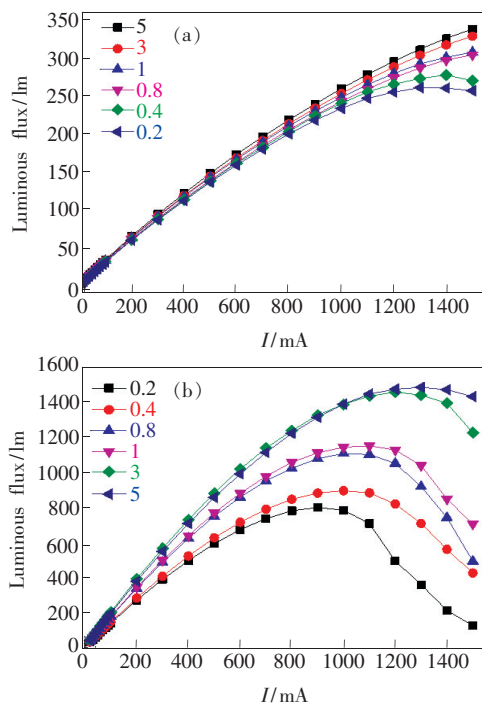


图 6 不同排布间距下蓝(a)、白(b)光变电流的光通量对比图。

Fig. 6 Luminous flux comparison diagram of blue (a) and white (b) light varying currents at different arrangement intervals

而黄色部分的辐射通量与视见函数的积分变小,黄光部分比蓝光部分变化量大^[19],所以白光的光通量随排布间距的减小而降低,且下降率更高。

发光效率是衡量电光源质量高低的最重要参量。蓝、白光 LED 芯片的外延结构和芯片制造工艺是一致的,仅有 CSP 白光 LED 芯片在蓝光 LED 芯片表面涂敷 YAG 荧光粉上的不同。变电流条件下的蓝、白光流明效率曲线对比如图 7 所示,驱动电流为 10 ~ 1 500 mA 时,CSP 白光 LED 的流明效率明显高于蓝光,且白光 LED 芯片和蓝光 LED 芯片的电流 Droop 效应变化趋势基本一致,主要表现为驱动电流大于 20 mA 时,光效均呈现下降的趋势,该现象与 Tanner 等的研究结果相一致^[20-21]。实验结果显示,在大电流的驱动条件下,CSP 白光 LED 下降的趋势更为明显,随着排布间距减小,白光 LED 芯片效率衰减率分别为 55.43%、66.08%、76.95%、83.52%、89.76%、94.69%。这是因为 YAG 荧光粉处于 Ce^{3+} 的 5d 离子层受温度影响大,易受晶场作用发生能级分裂,温度越高,晶格震动越剧烈,晶场增强,5d 能级分裂加剧,使基态与激发态之间的能量变得接近,导致量子效率随间距减小而降低显著。选择不同排布间距的芯片,其 Droop 效应表现出

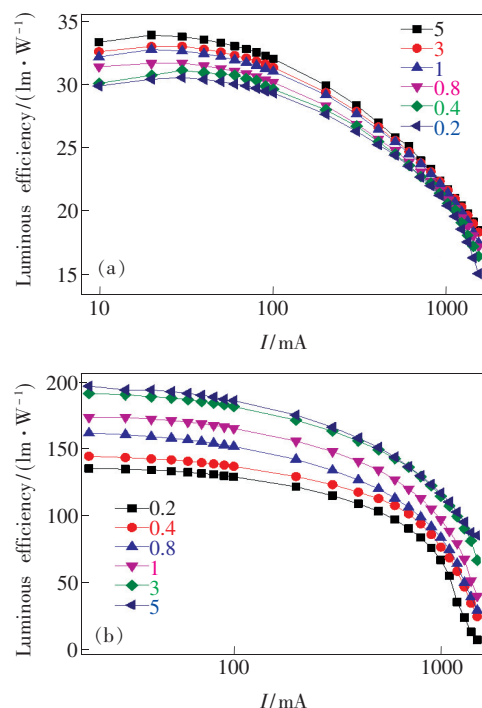


图 7 不同排布间距下蓝(a)、白(b)光光效对比图。

Fig. 7 Comparison of blue (a) and white (b) luminous efficiency under different arrangement spacings

较大的差异,主要归因于荧光粉的转换效率下降,蓝光激发黄色荧光粉时的能量损耗,造成发光效率随电流增加而下降。随着电流密度的增加,出现了“电流泄露”现象,造成PN结结区的载流子的复合几率下降^[22]。排布间距减小而引起的热效应又使主波长移动、荧光粉发光的强度下降,使得混光不匹配,从而导致了随着排布间距减小,白光LED发光效率下降的速度比蓝光LED下降得更快。

3.4 排布间距对CSP-LED芯片的影响

3.4.1 变电流EL光谱对比分析

图8(a)~(d)为CSP白光LED芯片排布间

距为0.2,0.8,3,5 mm时的变电流EL谱。从图中可以看出,正向电流为20~1 500 mA时,CSP-LED芯片的EL谱峰值波长分别红移了16,13,7,7 nm,同时随着注入电流密度的逐渐增大,能带填充效应增强,引起半峰宽展宽,可见CSP白光LED芯片在小排布间距下,芯片内部结构发生了明显的改变。且电流在1 A以上时,随着排布间距的减小,峰值波长的光谱积分强度下降趋势更加显著,分别降低了1.75,2.71,10.46,15.99。这主要是由于白光LED芯片的热拥堵引起了发光阱层的热应力,导致EL光谱强度下降显著。

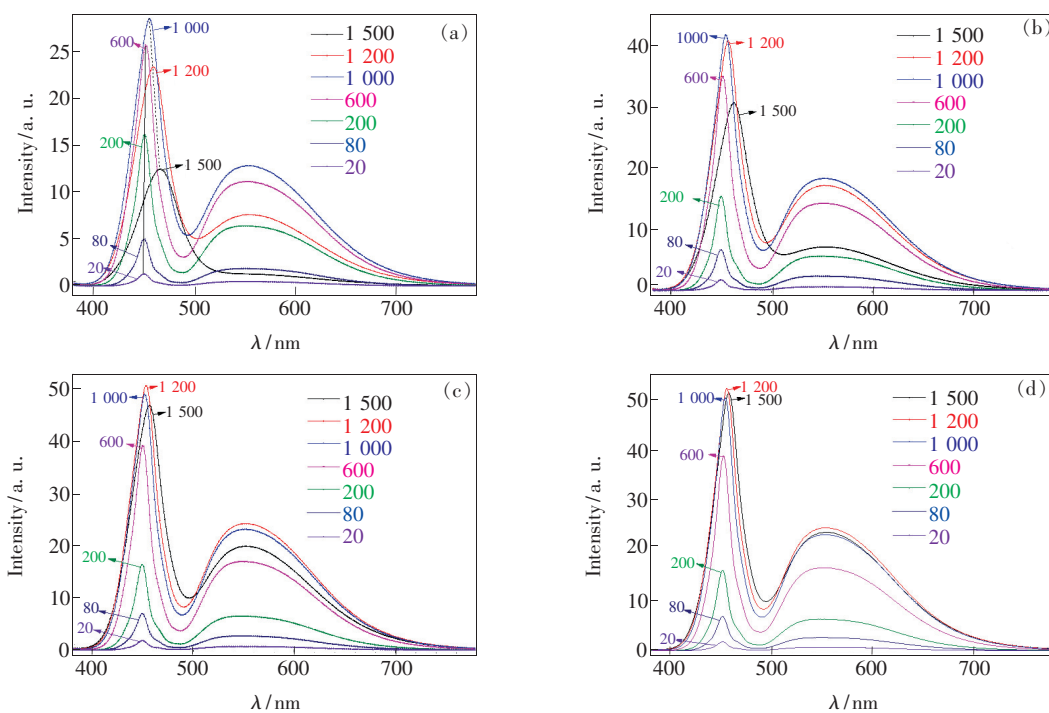


图8 CSP-LED芯片排布间距为0.2(a),0.8(b),3(c),5(d) mm时的变电流EL谱。

Fig. 8 EL spectra of variable current when the spacing of CSP-LED chips is 0.2 (a), 0.8 (b), 3 (c), 5 (d) mm, respectively.

3.4.2 排布间距对CSP-LED芯片荧光粉的影响

不同排布间距下CSP白光LED在不同的驱动电流下的色温特性曲线如图9(a)所示。结果显示,随着电流密度的增大,白光的色温整体趋于上升趋势。电流密度较小时,不同电流对色温影响的作用不显著;在大电流条件下,随着样品排布间距减小为3 mm以下,色温增大趋势非常明显。主要原因是由于排布间距减小时,芯片内部散热不良引起的热拥堵现象导致蓝光相对于黄光的比例在逐步增加,颜色由暖光向冷光转变^[23]。图9(b)

是在变化电流下LED的光谱红色比参数图,红色比是红光在整个可见光中所占的比例,结果显示电流在1 A左右时,红色比开始呈现下降的趋势,衰减率分别为3.57%、5.76%、9.93%、14.29%、16.20%、38.73%。表明排布间距越小,红光衰减越明显。间距为3 mm以上时,随着电流增大,变化基本呈持平趋势。LED色温的上升和红色比的下降,表明由于排布间距减小使得荧光粉退化是CSP白光LED衰减的主要原因。

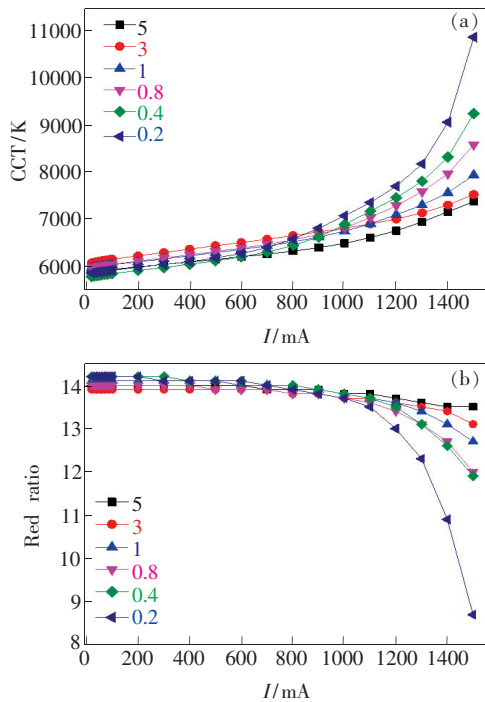


图 9 不同排布间距下白光色温 (a)、红色比 (b) 变化曲线。

Fig. 9 Color temperature (a) and red ratio curves (b) of white light at different arrangement intervals

4 结 论

以相同结构的蓝光 LED 器件作为 CSP 白光 LED 激发光谱,研究了变电流条件下不同排布间距对蓝、白光 LED 热拥堵效应的影响。实验结果表明,当驱动电流增大到 1 A 以上的极端电流条件时,随着注入电流的增大,白光 LED 芯片的温度显著升高,峰值波长的光谱红移,电压、光功率、光通量、光效等光电性能都呈现指数衰减趋势;最后对排布间距和 LED 荧光粉的热影响进行了分析,表明排布间距越小,红色比越低,荧光粉的退化更加显著。由于排布间距减小而引发的热效应促进了芯片与 YAG 荧光粉的相互热作用,使 CSP 白光 LED 芯片在 0.2 mm 的排布间距下,光谱强度降低了 59.9%,同时光效衰减了 94.69%,导致芯片光电性能较差,寿命较短。当 CSP-LED 芯片的排布间距为 3 mm 时,从实际生产的成本角度出发,已经表现出优良的光电性能,这对我国 CSP 车灯及 Mini 背光面的国产化及 LED 产业的发展具有十分重要的意义。

参 考 文 献:

- [1] 苏拾,张国玉,王凌云,等. 基于 LED 阵列光源的太阳模拟器 [J]. 光学精密工程, 2018,26(2):307-315.
SU S,ZHANG G Y,WANG L Y,*et al.*. Solar simulator based on LED array light source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018,26(2):307-315. (in Chinese)
- [2] PATWARDHAN V,KELKAR N,NGUYEN L. Lead-free wafer level-chip scale package:assembly and reliability [C]. *Proceedings of The 52nd Electronic Components and Technology Conference, San Diego*, 2002:1355-1358.
- [3] JIANG N,ZOU J,LI W B,*et al.*. Optical and thermal properties of flip-chip LED bulbs using chip-scale package [J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018,1074(1):012002-1-7.
- [4] SAMSUNG ELECTRONICS CO.,LTD. Middle power LED series flip chip package:LM131A [EB/OL]. (2015-07-10). http://www.samsung.com/global/business/business-images/led/file/product/lighting/201512/Data_Sheet_LM131A_Rev.1.6.pdf.
- [5] LUMILEDS HOLDING B. V. LUXEON flipchip white product datasheet [EB/OL]. (2015-08-05). <http://www.lumileds.com/uploads/569/DS117-pdf>.
- [6] SEOUL SEMICONDUCTOR CO.,LTD. Application note:WICOP2 [EB/OL]. (2015-09-15). http://www.seoulsemi-con.com/_upload/Goods_Spec/WICOP2_Application%20Note_CN_Rev1.2.pdf.
- [7] 黄德欢. 背光行业中自动化技术的运用研究与举例 [J]. 企业技术开发, 2019,38(8):40-42.
HUANG D H. Research and example on the application of automation technology in backlight industry [J]. *Technol. Dev. Enterpr.*, 2019,38(8):40-42. (in Chinese)
- [8] 赵新杰,蔡忆昔,王静,等. 基于半导体制冷技术的 LED 前照灯散热器设计与优化 [J]. 发光学报, 2014,35(10):1269-1275.
ZHAO X J,CAI Y X,WANG J,*et al.*. Thermal model design and optimize of LED headlamp cooling device based on semiconductor refrigeration [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014,35(10):1269-1275. (in Chinese)
- [9] WANG J,CAI Y X,ZHAO X J,*et al.*. Thermal design and simulation of automotive headlamps using white LEDs [J].

- Microelectron. J.*, 2014,45(2):249-255.
- [10] 张国元. 铝基板表面氧化膜的制备及其绝缘导热性能研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2019.
ZHANG G Y. *Studies on Preparation of Oxidation Surfaces on Aluminum Substrate and The Insulation and Thermal Conductivity of The Surfaces* [D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 朱海涛,傅仁利,费盟,等. 铝/氧化铝复合基板封装的LED光源的光热特性 [J]. 光学学报, 2017,37(10):1023002-1-10.
ZHU H T, FU R L, FEI M, *et al.*. Optical and thermal performance of LED light source packaged by Al/Al₂O₃ composite substrate [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2017,37(10):1023002-1-10. (in Chinese)
- [13] 夏克强,黄增彪,余乃东,等. 4 W 高导热铝基板的研究与制备 [J]. 覆铜板资讯, 2019(1):35-39.
XIA K Q, HUANG Z B, SHE N D, *et al.*. Research and preparation of 4 W high thermal conductivity aluminum substrate [J]. *CCL Inf.*, 2019(1):35-39. (in Chinese)
- [14] 殷录桥,翁菲,宋朋,等. LED芯片与YAG荧光粉的相互热作用 [J]. 光学学报, 2014,34(3):0323002-1-7.
YIN L Q, WENG F, SONG P, *et al.*. Thermal interact effects of LED chip with YAG phosphor layer [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2014,34(3):0323002-1-7. (in Chinese)
- [15] QIAN X L, LI Y, SHI M M, *et al.*. Color converter based on transparent Ce: YAG ceramic by different package structure for high-power white LED [J]. *Ceram. Int.*, 2019,45(17):21520-21527.
- [16] 薛正群,王凌华,苏辉. 温度对InP激光器波长蓝移影响的分析 [J]. 光子学报, 2018,47(1):0125002-1-6.
XUE Z Q, WANG L H, SU H. Analysis the influence of temperature on the wavelength blue shift of InP lase [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2018,47(1):0125002-1-6. (in Chinese)
- [17] 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.
ZOU S P, WU B X, WAN Z P, *et al.*. Effect of current-temperature stress on the reliability of GaN LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016,37(1):124-129. (in Chinese)
- [18] KEGEL J, LAFFIR F R, POVEY I M, *et al.*. Defect-promoted photo-electrochemical performance enhancement of orange-luminescent ZnO nanorod-arrays [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2017,19(19):12255-12268.
- [19] 钟文姣,魏爱香,招瑜. 结温对GaN基白光LED光学特性的影响 [J]. 发光学报, 2013,34(9):1203-1207.
ZHONG W J, WEI A X, ZHAO Y. Dependence of GaN-based white LED colorimetric parameters on junction temperature [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013,34(9):1203-1207. (in Chinese)
- [20] TANNER P, HAN J, DIMITRIJEV S. Temperature independence of the droop effect in blue LED's grown on silicon substrates [C]. *Proceedings of 2015 12th China International Forum on Solid State Lighting, Shenzhen, China*, 2015:40-42.
- [21] 黄斌斌,熊传兵,张超宇,等. 硅基板和铜基板垂直结构GaN基LED变温变电流发光性能的研究 [J]. 物理学报, 2014,63(21):217806-1-7.
HUANG B B, XIONG C B, ZHANG C Y, *et al.*. Electroluminescence properties of vertical structure GaN based LED on silicon and copper submount at different temperatures and current densities [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2014,63(21):217806-1-7. (in Chinese)
- [22] SHAO X J, HAI L, CHEN D J, *et al.*. Efficiency droop behavior of direct current aged GaN-based blue light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009,95(16):163504-1-3.
- [23] 郑峰,刘丽莹,刘小溪,等. 多主色LED照明光源的相关色温调控 [J]. 光学精密工程, 2015,23(4):926-933.
ZHENG F, LIU L Y, LIU X X, *et al.*. Control of correlated color temperature for multi-primary color LED illumination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(4):926-933. (in Chinese)



刘倩(1993 -),女,山西吕梁人,硕士研究生,2017年于石家庄学院获得学士学位,主要从事半导体发光材料与器件的研究。
E-mail: qianliu0118@163.com



熊传兵(1973 -),男,江西南昌人,博士,教授,硕士研究生导师,2008年于南昌大学获得博士学位,主要从事半导体发光材料与器件的研究。
E-mail: chuanbingxiong@126.com