

LED 芯片与 YAG 荧光粉的相互热作用

殷录桥^{1,2} 翁菲^{1,2} 宋朋^{1,2} 张金龙^{1,2} 杨卫桥³ 张建华^{1,2*}

¹ 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072
² 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072; ³ 上海半导体照明工程技术研究中心, 上海 201203

摘要 大功率白光 LED 作为新一代照明光源的优势越来越明显,但其光衰机制综合了 YAG 荧光粉、LED 芯片以及封装散热多重因素,衰减机理复杂。为研究 LED 芯片与荧光胶的相互热影响,基于蓝光 LED 器件基板温度可控实现蓝光 LED 器件温度稳定,并通过外部加热(以此作为 LED 热量作用于荧光胶)的方式控制荧光胶、荧光粉、硅胶的温度。重点研究了温度从 27 °C 升高到 220 °C 对三者光衰、主波长特性的影响。对荧光胶与 LED 芯片的近距相互热影响进行了测试,结果表明荧光粉涂覆量会引起光功率的降低,而且随着光功率的降低,LED 芯片结温呈现指数升高。实验证明荧光胶层与 LED 芯片是一个相互影响的复合热源模型。

关键词 光电子学;光衰;温度影响;光谱强度

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0323002

Thermal Interact Effects of LED Chip with YAG Phosphor Layer

Yin Luqiao^{1,2} Weng Fei^{1,2} Song Peng^{1,2} Zhang Jinlong^{1,2}
Yang Weiqiao³ Zhang Jianhua^{1,2}

¹ Key Laboratory of Advanced Display and System Applications (Shanghai University),
Ministry of Education, Shanghai 200072, China

² School of Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

³ Shanghai Research Center of Engineering and Technology for Semiconductor Lighting, Shanghai 200072, China

Abstract The lighting advantages become more and more obvious for the white high power light emitting diode (HP-LED) as the next generation lighting source. But the light decay mechanism is complicated because of the compositions of the LED chip, YAG phosphor and even the thermal management of packaging. In order to investigate the light decay mechanism of the white HP-LED, the effects of temperature on the silicone-gel with phosphor, YAG phosphor particles and the silicone-gel are studied, respectively. The optical properties of the blue LED chip are kept in steady state by the HP-LED substrate temperature controlling. The silicone-gel with phosphor, YAG phosphor particles and the silicone-gel is heated by a heating source respectively. The tested results show that the optical radiant power decreases as an exponential relation with the temperature increasing from 27 °C to 220 °C. The thermal properties of the phosphor layer coated on the HP-LED are studied. Results show that the phosphor layer coating can affect the radiant power and the pn junction temperature of the HP-LED. The above results show that the white HP-LED is a heat source interacted both with the LED chip and the YAG phosphor particles.

Key words optoelectronics; light decay; temperature effect; spectrum intensity

OCIS codes 230.2090; 230.3670; 160.4760; 350.5340

收稿日期: 2013-09-03; **收到修改稿日期**: 2013-10-20

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013103)、十二五科技支撑项目(2011BAE01B14)、上海高校青年教师培养资助计划、上海大学科技创新基金(sdcx2012024)

作者简介: 殷录桥(1983—),男,博士,讲师,主要从事大功率 LED 芯片界面互连及相关可靠性方面的研究。

E-mail: lqyin@shu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: jhzhang@shu.edu.cn

1 引 言

白光 LED 具有发光效率高、寿命长和环保等优点,被认为是最具应用前景的新一代照明光源之一。其中,利用黄色荧光粉封装的白光 LED,因制作工艺简单,是通用照明中最常用的一种工艺。蓝光 LED 激发黄色荧光粉,会产生黄绿光,可以与透光荧光粉的蓝光混合成白光。在蓝光激发黄色荧光粉的过程中,会有一部分光能都转化成热能,再加上芯片工作时传导到荧光胶上的热量,荧光粉通常处于高温状态,导致白光 LED 光衰较快。Yan 等^[1]通过模拟发现,白光 LED 工作时,荧光胶的温度比芯片结温还高。由于荧光胶的热导率偏低,过高的温度会引起诸如波长红移、量子效率降低、荧光胶退化等问题,甚至会使荧光胶碳化^[2-4]。

由于白光 LED 主要使用的荧光粉是 YAG 荧光粉,Zhang 等^[5]研究了 YAG:Ce³⁺ 荧光粉的激发光谱和发射光谱,发现随着温度的升高,荧光粉的发光强度下降,在同种温度下,使用 340 nm 激光激发得到的发射光谱的衰减率比使用 460 nm 激光激发得到的发射光谱的衰减率小。Shao 等^[6]在 YAG 荧光粉中掺杂 Gd 和 La 并研究了其发射光谱和热稳定性,发现当温度从 25 °C 升高到 200 °C 时,掺杂了 Gd 和 La 的荧光粉比普通 YAG 荧光粉具有更高的热稳定性,衰减率降低了约 7%。用于激发紫外光的具有良好热稳定的荧光粉材料也一直有人研究。Jong 等^[7]研究了紫外光激发的碱土金属硅酸盐荧光粉在不同温度下的光谱曲线,发现随着温度的升高,Sr₂SiO₄、Ca₂SiO₄ 和 Ba₂SiO₄ 在 370 nm 的激发光下得到的光谱强度都呈现下降趋势。Wu 等^[8]研究了一种近紫外光激发的蓝绿色荧光粉 LiBaPO₄:Eu²⁺,当温度从 270 °C 升到 450 °C 时,其发光效率衰减率低于常用的 YAG 荧光粉。Bandi 等^[9]研究了一种近紫外光激发的蓝色荧光粉 NaSrPO₄:Eu²⁺,当温度从 25 °C 升到 200 °C 时,其发光效率衰减率低于常用的 YAG 荧光粉,表现出良好的热稳定性。LED 封装中,荧光粉的封装位置也能有效地提高荧光粉的热学性能。Hwang 等^[10]研究了 LED 封装中荧光胶和芯片的相对位置对 LED 寿命的影响,发现荧光胶在远离芯片时比荧光胶紧密贴合芯片时的温度低。Lago 等^[11]对这种荧光胶远离芯片的 LED 封装结构进行了可靠性实验,证明这种封装结构具有良好的可靠性。不同掺杂元素对 Ce:

YAG 荧光粉发射光谱的发射峰位置和强度均会产生影响^[12],Ce:YAG 单晶对白光发光二极管性能的影响也有研究^[13],此外还有基于离子注入法在金刚石薄膜中注入不同剂量的 Ce³⁺ 的电致发光特性研究^[14]。

目前荧光粉的外量子效率普遍不高,尤其是氮化物的荧光粉,效率在 40%~70% 附近^[15-17]。而 YAG 效率相对较高,但品质好的 YAG 黄色荧光粉的外量子效率也仅有 87% 左右^[18],其余的能量更多的是以热量释放。

基于以上的研究,本文将通过实验研究 YAG 荧光粉与 LED 芯片的相互热影响对 HP-LED 器件发光性能的影响,其中关于 LED 芯片热量对荧光粉的影响,实验中通过制冷温控板控制 LED 器件的光学稳定性,用外部独立加热的方式作为热源(LED 芯片的温度)来控制荧光胶/荧光粉、硅胶温度变化,然后测试相关光学性能,并通过不同的荧光粉涂覆量验证了荧光粉的热释放对 LED 芯片结温的影响。

2 实 验

图 1 分别为荧光胶测试结构、荧光粉测试结构、硅胶测试结构、荧光胶贴在芯片上的光特性、温度测试结构示意图。其中图 1(a)~(c)是远程荧光粉激发模型(LED 芯片控温来保证蓝光光谱的稳定性),测试时,基板材料为氧化铝陶瓷覆铜基板,热导率大概是 30 W/mK。蓝光器件是 Cree 公司的 XP 系列(2.45 mm×2.45 mm),该器件基板导热性能优越,通过锡膏将该器件与氧化铝陶瓷覆铜基板连接在一起(基板尺寸 18 mm×18 mm,器件与基板的界面热阻约为 2 °C/W)。蓝光 LED 器件基板通过温控仪将温度控制在 25 °C 附近(通过控制制冷板的温度保持 23 °C)。支架为铁氟龙耐高温材料,铁氟龙上表面的加热板为圆形,中间有个 5 mm 的圆孔,将荧光胶、硅胶固化在该孔中,热电偶的位置在荧光胶/硅胶的中心处,实验中通过圆形的加热板来控制荧光胶/硅胶的温度从室温变化到 220 °C。而对于荧光粉粉体的温度效应实验,需要在加热板上放置一块玻璃片,然后将荧光粉粉体放置在对应该加热板圆孔的玻璃板上,热电偶位于粉体中间的玻璃表面。图 1(d)结构中的基板为铝基板(分别为 1.2 mm 与 1 mm 厚)。

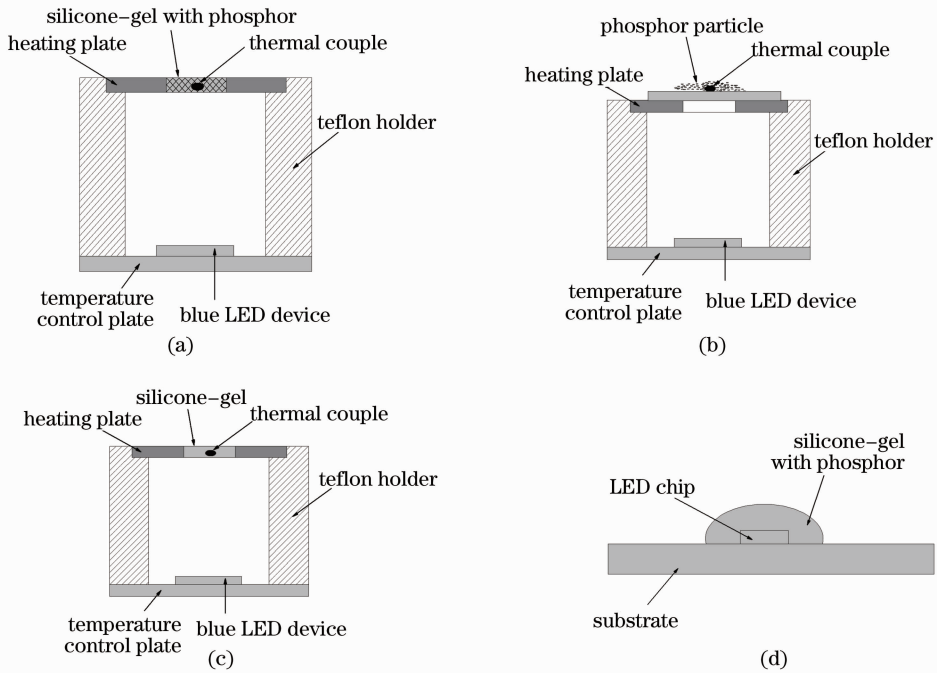


图 1 (a) 荧光胶测试结构；(b) 荧光粉测试结构；(c) 硅胶测试结构；(d) 荧光胶贴在芯片上的温度测试

Fig. 1 (a) Silicone-gel with phosphor test; (b) phosphor particle test; (c) silicone-gel test; (d) temperature test of LED device with YAG phosphor

实验中所用的硅胶为道康宁 6550 系列, 荧光粉为 YG-04, 荧光胶的荧光粉浓度为 20% (文章最后面的验证实验所用浓度为 0%~20%), 芯片为 Cree 公司的 EZ900, 图 1(d) 所示的封装器件采用的是带绝缘层的普通铝基板。

3 结果及讨论

图 2 是荧光胶在不同温度下受蓝光激发的光功率及主波长变化, 通过该图可以发现, 随着温度从 27 °C 升高到 220 °C, 在保持蓝光 LED 器件工作状态稳定的前提下 (基板温度控制在 23 °C), 荧光胶的激发光功率降低到原来的 54.5%。主波长从 572.1 nm 升高到 574.6 nm。

图 3 是荧光胶在不同温度下受蓝光激发的激发光谱强度变化图, 通过该光谱强度的变化可以发现, 随着荧光胶温度的上升, 在相同的 LED 蓝光激发下, 激发光谱强度呈现明显的下降趋势。

图 4 是荧光粉在不同温度下受蓝光激发的光功率及主波长变化图, 通过该结果可以发现, 随着温度从 27 °C 升高到 220 °C, 在同样的蓝光 LED 器件激发下, 其光功率降低到原来的 79.3%。主波长从 574.7 nm 升高到 582.4 nm。

对图 2、4 的点进行拟合, 拟合曲线分别如图中的实线所示。通过拟合曲线发现随着温度的上升,

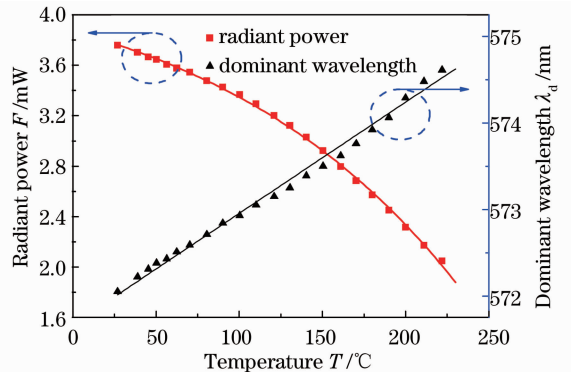


图 2 荧光胶在不同温度下受蓝光激发的光功率及主波长

Fig. 2 Relationship among radiant power, dominant wavelength and temperature of silicone-gel with phosphor
荧光胶与荧光粉的光功率均呈现指数衰减, 而主波长随温度呈现线性变化, 拟合公式分别为

$$p = p_0 + A \exp(bT), \quad (1)$$

$$\lambda = h + BT, \quad (2)$$

式中 A, b, h, B 均为常数, p 为光辐射功率, T 为温度, λ 为主波长。

图 5 是荧光粉在不同温度下受蓝光激发的激发光谱, 通过该图可以发现, 随着温度从 27 °C 升高到 220 °C, 在同样的 LED 器件激发下, 激发光谱的黄绿光波段发光强度呈现明显下降趋势。蓝光峰部分有轻微的下降, 原因是随着温度的上升, 硅胶的折射

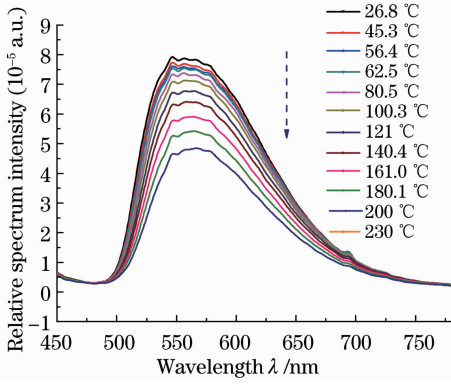


图 3 荧光胶在不同温度下的蓝光激发光谱强度
Fig. 3 Effect of temperature on excitation spectrum intensity of silicone-gel with phosphor

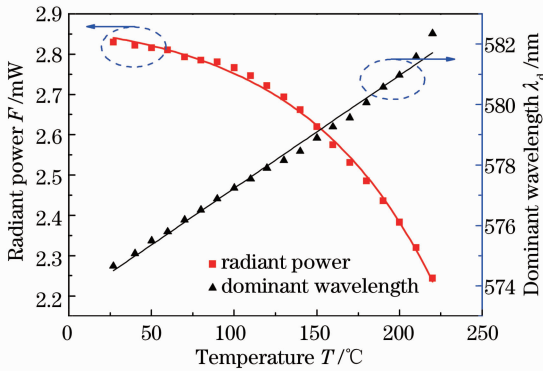


图 4 荧光粉在不同温度下受蓝光激发的光功率及主波长
Fig. 4 Relationship among radiant power, dominant wavelength and temperature of phosphor particles

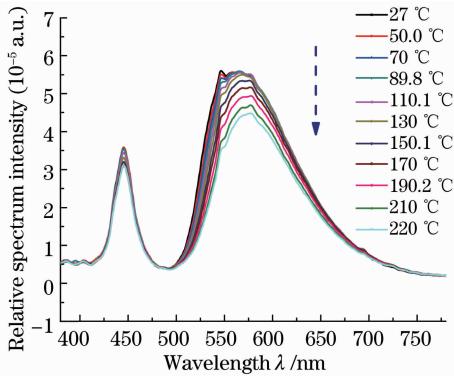


图 5 荧光粉在不同温度下的蓝光激发光谱
Fig. 5 Effect of temperature on the excitation spectrum intensity of phosphor particles

率略有降低,导致蓝光的透射率降低,从而呈现光谱强度略降的现象。而对于黄绿光波段的光谱强度变化,图 2、图 4 呈现一致的趋势,均为指数规律下降,主要原因在于随着热量的增加,热激活能大于 Ce^{3+} 的激活能,导致 Ce^{3+} 没有发生复合辐射,而直接从基态与激发态之间的交叉点以非辐射转化的形式热

释放^[5],引起光谱强度下降。

图 6 是配制荧光胶用的硅胶在不同温度下的 LED 器件主波长和透过的光功率变化。通过蓝光 LED 器件照射该硅胶,可以发现,随着温度从 27 °C 升高到 220 °C,蓝光 LED 器件的光功率、主波长透过硅胶之后变化比较小,其中光功率总体趋势有轻微下降,主要是因为硅胶的升温过程中,硅胶折射率有轻微下降。

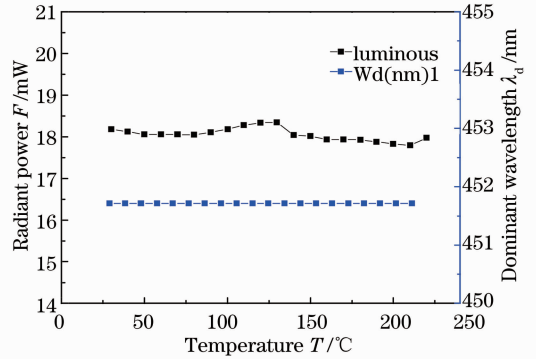


图 6 硅胶的温度对 LED 器件主波长和透过的光功率的影响
Fig. 6 Relationship among radiant power, dominant wavelength of LED device and temperature for silicone-gel

图 7 是在蓝光 LED 器件透过不同温度硅胶的光谱图,温度从 30.2 °C 升高到 220 °C 的过程中,光谱强度基本没有变化。说明硅胶在短期内由温度引起的透光性能变化不大。

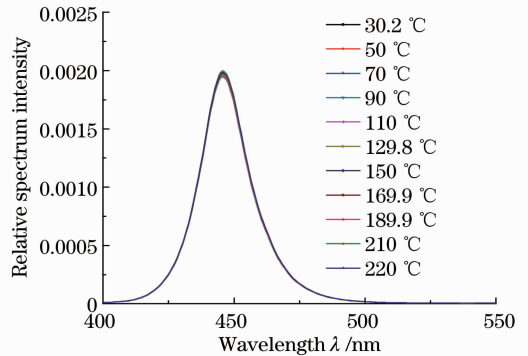


图 7 硅胶温度变化对 LED 器件光谱强度的影响
Fig. 7 Effect of temperature on the excitation spectrum intensity of LED device

通过以上实验结果可以发现,短时间内温度升高对硅胶透射率影响较小,而对荧光胶的影响较为明显。随着温度的升高,荧光胶的光谱强度呈现指数衰减,其主要原因是 YAG 黄色荧光粉的激发强度降低。

为进一步研究荧光粉直接涂覆在蓝光 LED 芯片表面时芯片与荧光粉的相互热影响对 HP-LED 器件发光性能的影响,对同种 LED 芯片、同种工艺

封装的 LED 器件,分别进行硅胶、荧光胶的灌封,然后进行光学参数、热学参数的测试。基于 T3Ster 热阻测试仪测试的温升结果如图 8 所示(白光 LED 器件色温 3800 K,测试保持 LED 基板恒定 25 °C)。通过图 8 可以发现,灌封了荧光胶、硅胶的 LED 器件在 350 mA 电流驱动条件下的温升分别为 15.8 °C 和 13.6 °C,温升比灌封了同种硅胶的 LED 器件高 15.9%。图 9 为在驱动电流从 50 mA 增加到 750 mA 的过程中该两种器件光功率的变化情况,通过该图可以发现,灌封了荧光胶的 LED 器件明显比只灌封了同种硅胶的 LED 器件光功率低,而且驱动电流越大,差异越大,当驱动电流增加到 750 mA 时,该光功率差异达到了 35%。

通过图 9 也可以发现,温度对白光 LED 光功率(350 mA 驱动)的影响呈线性衰减趋势,结合图 2、4

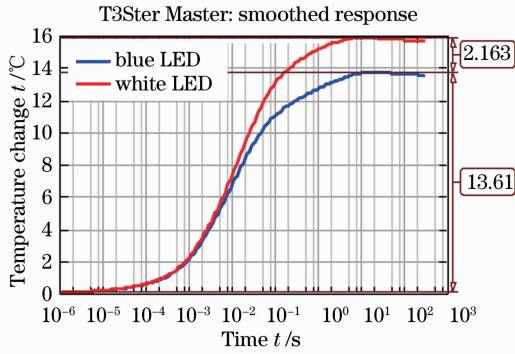


图 8 蓝光 LED 与白光 LED 的温升对比
Fig. 8 Junction temperature comparison between blue LED and white LED

表 1 不同浓度荧光粉封装的 LED 器件光热性能

Table 1 Thermal and optical performances of HP-LED with different phosphor concentration ratios

Phosphor concentration ratio $w_1/\%$	Radiant power P/mW	Relatively reduced radiant power P/mW	pn junction temperature $t/^\circ\text{C}$
0	327.8	0	66.73
5	268.22	59.58	68.79
12	214.38	113.42	74.67
20	202.46	125.34	78.41

表 2 不同荧光粉涂覆量的 LED 器件光热性能

Table 2 Thermal and optical performances of HP-LED with different phosphor volumes

Normalized thickness of silica-gel with 20% phosphor	Radiant power P/mW	pn junction temperature $t/^\circ\text{C}$
0.47	242.74	75.79
0.62	216.64	77.38
0.81	208.48	78.78
1	201.65	79.35

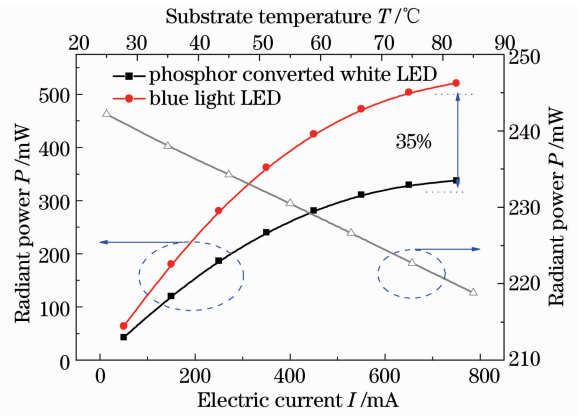


图 9 蓝光 LED 与白光 LED 的光辐射功率与电流温度的关系

Fig. 9 Relationship among radiant power, electric current and substrate temperature of blue and white LED

温度对荧光粉的影响呈现指数衰减趋势,可以说明图 9 中蓝光 LED 与白光 LED 光辐射功率差距随电流的升高越来越大,主要是由 YAG 荧光粉在该过程中受温度影响呈现指数衰减引起的。

为进一步证明该推断,按照图 1(d)所示的封装结构重新封装了两组 LED 器件,其中第一组是保持荧光胶的涂覆量不变,改变荧光粉的浓度;第二组是保持荧光粉的浓度不变,改变荧光胶的涂覆量。每种条件下有 5 颗器件,然后分别测试其光学、热学性能,其中热学测试在空气静置箱内进行。测试结果分别如表 1、表 2 所示(其中第一组 LED 器件封装用基板厚度为 1.2 mm,第二组 LED 器件封装基板厚度为 1 mm)。

图 10 是不同浓度荧光粉封装的 LED 光功率损失量与 pn 结温度的关系图。结合表 1, 可以发现, 随着荧光粉浓度的升高, LED 器件的光功率损失量逐渐增加, 引起了 LED 器件结温的逐渐升高。

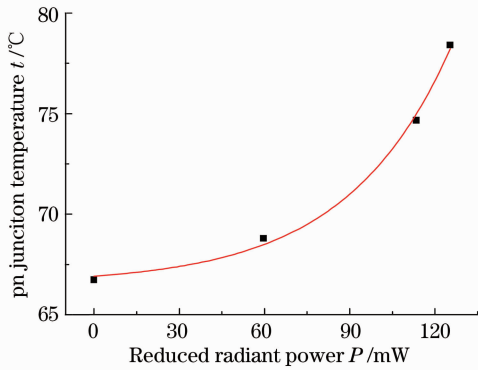


图 10 基于不同浓度荧光粉封装的 LED 器件光功率损失量与结温变化的关系

Fig. 10 Relationship between pn junction temperature and radiant power loss of HP-LED with different concentration ratios of phosphor

对光功率损失量与结温进行曲线拟合, 得

$$y = y_0 + A \exp(B \cdot x). \quad (3)$$

基于 20% 浓度荧光粉, 不同的涂覆量封装的 LED 器件, 光功率损失与 LED 芯片结温的关系图如图 11 所示, 对该数据进行曲线拟合, 光损失率与结温的拟合关系式也是 (3) 式的指数关系式。

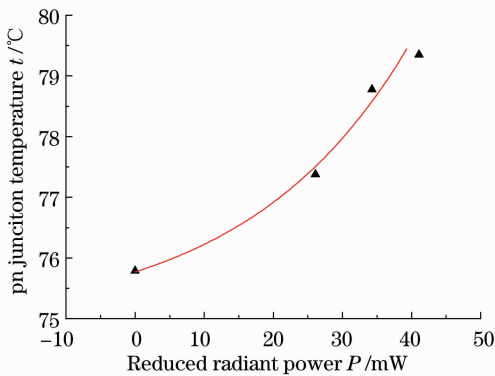


图 11 基于不同荧光粉涂覆量封装的 LED 器件光功率损失量与结温变化的关系

Fig. 11 Relationship between pn junction temperature and radiant power loss of HP-LED with different phosphor dispensing volumes

在第一组的 LED 模型中, 由于荧光粉浓度的变化引起的光功率损失, 会引起该 LED 芯片 pn 结温度呈现指数上升, 在涂覆体积一定时, 当荧光粉的浓度从 5% 升高到 20% 时, LED 芯片的结温将由 68.8 °C 升高到 78.4 °C, 升高幅度高达 14%。该 14% 的结

温温升一部分是由荧光粉的非辐射复合产生的, 还有一部分是由于该热量的增加引起了 LED 芯片内量子效率的降低、非辐射复合率的升高引起的, 是 LED 芯片与荧光粉在受热作用下共同引起的。

该温度的升高除了与荧光粉的涂覆量(浓度)有关外, 还与 LED 器件的散热有关。对比表 1 和表 2, 可以发现, 同样基于 20% 浓度封装的 LED 器件(涂覆量也一致), 由于封装基板厚度的不同, 1.2 mm 和 1 mm 厚的基板封装的两种 LED 器件结温分别是 78.41 °C 和 79.35 °C。

图 12 是该实验所示的实验结构模型, LED 芯片在工作状态部分蓝光激发黄色 YAG 颗粒, 辐射复合产生蓝绿光。当封装结构散热不佳、工作电流较大以及由于荧光粉释放的热量引起 LED 芯片热量集聚, 当该热量的激活能超过 Ce^{3+} 本身的激活能时, 会导致 Ce^{3+} 从基态和稳态之间的交叉点以非辐射复合的形式发生热释放, 该非辐射复合引起荧光胶层及 pn 结的温度升高。虽然荧光粉的浓度会适当地增加荧光胶层的热导率^[19], 但是当芯片产生的热量与 Ce^{3+} 非辐射复合的热量增加量和大干荧光胶的热传导增加量时, 除引起 LED 芯片 pn 结温度上升外, 还会大幅度引起荧光胶的温度上升, 而随着荧光胶层温度的上升, YAG 的光谱强度会按指数衰减、LED 芯片发热量也会继续升高, 降低内量子效率, 从而进一步增加了荧光胶层的非辐射复合率, 造成恶性循环, 直至达到新的热平衡或者引起荧光胶层的碳化^[4]。

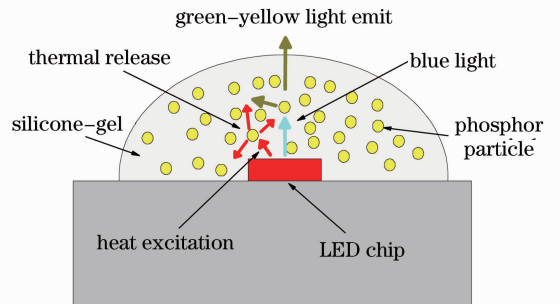


图 12 LED 芯片与 YAG 荧光粉的相互热影响模型
Fig. 12 Heat interact module of LED chip and YAG phosphor

4 结 论

在蓝光 LED 器件独立控温作为激发光谱的前提下, 研究了温度的变化对荧光胶、荧光粉颗粒、硅胶的光学特性影响, 实验结果表明: 随着荧光胶、荧光粉颗粒、硅胶的温度从 27 °C 升高到 220 °C, 荧光

胶、荧光粉受蓝光LED的激发光功率呈现指数衰减趋势,该趋势是由于高温下,热激活能超过了荧光粉的激活能,导致 Ce^{3+} 发生了非辐射热释放,从而引起了光谱激发强度衰减。在该温度的变化过程中,激发光谱的主波长随着温度的升高呈线性变化。在同样的温度升高过程中,硅胶的透光性基本没有受到影响。最后进行了荧光胶与LED芯片直接接触的热影响测试,结果表明荧光粉层会引起光功率的下降、pn结温的上升,随着光功率的下降芯片的结温呈现指数上升。涂覆量对荧光胶层温度、芯片结温的影响跟涂覆的量、LED器件的散热条件均有关系,当涂覆量继续增加时,荧光胶层的温度会有明显的升高幅度,原因是芯片与YAG荧光粉颗粒的非辐射复合率随着温度的升而高降低。

参 考 文 献

- 1 B H Yan, N T Tran, J P You, *et al.*. Can junction temperature alone characterize thermal performance of white LED emitters [J]. *Photon Technol Lett*, 2011, 23(9): 555–557.
- 2 N Narendran, Y Gu, J P Freyssinier, *et al.*. Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs [J]. *J Cryst Growth*, 2004, 268(3): 449–456.
- 3 B F Fan, H Wu, Y Zhao, *et al.*. Study of phosphor thermal-isolated packaging technologies for high-power white light-emitting diodes [J]. *Photon Technol Lett*, 2007, 19(11): 1121–1123.
- 4 X B Luo, X Fu, F Chen, *et al.*. Phosphor self-heating in phosphor converted light emitting diode packaging [J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2013, 58(1): 276–281.
- 5 Y F Zhang, L Li, X S Zhang, *et al.*. Temperature effects on photoluminescence of YAG:Ce³⁺ phosphor and performance in white light-emitting diodes [J]. *J Rare Earth*, 2008, 26(3): 446–449.
- 6 Q Y Shao, H J Li, Y Dong, *et al.*. Temperature-dependent photoluminescence studies on Y_{2.93-x}Ln_xAl₅O₁₂:Ce_{0.07} (Ln=Gd, La) phosphors for white LEDs application [J]. *J Alloys Compd*, 2010, 498(2): 199–202.
- 7 S K Jong, H P Yun, M K Sun, *et al.*. Temperature-dependent emission spectra of M₂SiO₄:Eu²⁺ (M=Ca, Sr, Ba) phosphors for green and greenish white LEDs [J]. *Solid State Commun*, 2005, 133(7): 445–448.
- 8 Z C Wu, J Liu, M L Gong, *et al.*. Optimization and temperature-

- dependent luminescence of LiBaPO₄:Eu²⁺ phosphor for near-UV light-emitting diodes [J]. *J Electrochem Soc*, 2009, 156(3): H153–H156.
- 9 V R Bandi, J Jeong, H J Shin, *et al.*. Thermally stable blue-emitting NaSrPO₄:Eu²⁺ phosphor for near UV white LEDs [J]. *Opt Commun*, 2011, 284(19): 4504–4507.
 - 10 J H Hwang, Y D Kim, J W Kim, *et al.*. Study on the effect of the relative position of the phosphor layer in the LED package on the high power LED lifetime [J]. *Phys Status Solidi (C)*, 2010, 177(7): 2157–2161.
 - 11 M D Lago, M Meneghini, N Trivellini, *et al.*. Phosphors for LED-based light sources: thermal properties and reliability issues [J]. *Microelectron Reliab*, 2012, 52(9): 2164–2167.
 - 12 Tian Qingzhen, Miao Hongli, Sun Haigang. Luminescence characteristics of YAG:Ce³⁺(Ga, Pr) phosphor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(s1): s116005.
田庆震, 苗洪利, 孙海港, 等. YAG:Ce³⁺(Ga, Pr)荧光粉发光特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(s1): s116005.
 - 13 Lu Shenzhou, Yang QiuHong, Xu Feng, *et al.*. Investigation of white light emitting diode based on Ce:YAG single crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0323001.
陆神州, 杨秋红, 徐峰, 等. 基于Ce:YAG单晶的白光发光二极管性能研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0323001.
 - 14 Wang Lijun, Wang Zi, Zhu Yuchuan, *et al.*. Blue electroluminescence from Ce³⁺ ion implant doped diamond thin films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0331001.
王丽军, 王子, 朱玉传. Ce³⁺注入掺杂金刚石薄膜蓝光电致发光研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0331001.
 - 15 R L Toquin, A K Cheetham. Red-emitting cerium-based phosphor materials for solid-state lighting applications [J]. *Chem Phys Lett*, 2006, 423(4): 352–356.
 - 16 T Suehiro, N Hirosaki, R J Xie, *et al.*. Blue-emitting LaSi₃N₅:Ce³⁺ fine powder phosphor for UV-converting white light-emitting diodes [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(5): 51903–51903.
 - 17 I Kazuo, N Hirosaki, R J Xie, *et al.*. Highly efficient and thermally stable blue-emitting AlN:Eu²⁺ phosphor for ultraviolet white light-emitting diodes [J]. *J Phys Chem C*, 2009, 113(21): 9392–9397.
 - 18 Z Y Liu, S Liu, K Wang, *et al.*. Measurement and numerical studies of optical properties of YAG:Ce phosphor for white light-emitting diode packaging [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(2): 247–257.
 - 19 Zhang Qin. Research on Temperature and Humidity Accelerated Life Testing of High Power Light Emitting Diode Module [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011. 33–44.
张芹. 大功率LED模块温度湿度加速寿命试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. 33–44.

栏目编辑: 韩峰