

荧光粉浓度和电流强度对白光 LED 特性的影响

李亮 金尚忠 岑松原 梁培 王乐 曹宇杰

(中国计量学院现代计量测试技术及仪器浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要 讨论了荧光粉浓度及驱动电流强度对白光 LED 特性的影响。采用软件模拟实验和实际封装测试相结合的研究方法进行分析研究。对荧光粉浓度变化对白光 LED 光通量和相关色温(CCT)的影响进行了三维光线追迹模拟,并且进行了实际的封装验证。另外对白光 LED 的节温和显色性也做了深入细致的研究。研究表明:CCT 随着荧光粉浓度的增大而减小,光通量则先上升后下降。同时由荧光粉浓度和驱动电流强度变化所引起的节温升高会降低荧光粉的转换效率。对显色性而言,采用高浓度荧光粉封装的白光 LED 有相对低的显色指数;并且显色指数随着驱动电流强度的增加而升高,最终趋于稳定。

关键词 光学器件;白光 LED;模拟;封装;荧光粉;驱动电流

中图分类号 TN312.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.032301

Influence of Phosphor Concentration and Current Intensity on Phosphor-Based White LED Characteristics

Li Liang Jin Shangzhong Cen Songyuan Liang Pei Wang Le Cao Yujie

(Key Laboratory of Zhejiang Province Modern Measurement and Testing Technology and Instruments, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract LED packaging is crucial for the development of solid-state lighting. The common method of making WLED is to mix the blue light from the LED die and the wavelength converted yellow light from the phosphor layer. We discuss the influence of phosphor concentration and drive current intensity on white LED characteristics. Software simulations and real packagings are adopted for the study. Influences of phosphor concentration on luminous flux and correlated color temperature (CCT) for white LED are investigated with three-dimensional ray tracing simulations and the results are verified by real packaging. In addition, junction temperature and color rendering of white LED are also investigated. The results show that CCT decreases with the increase of phosphor concentration, however, luminous flux achieves an optimal value and then decreases. The increased junction temperature caused by phosphor concentration and drive current intensity change degrades the phosphor conversion efficiency. For the color rendering of white LED, a higher phosphor concentration leads to a lower color rendering index, and the color rendering index increases with the increase of drive current intensity till it achieves stabilization.

Key words optical devices; white LED; simulation; packaging; phosphor; drive current

OCIS codes 230.1150; 160.2540

1 引言

随着全球能源危机和环境污染的不断加重,节能、环保已成为社会发展的主流方向^[1]。在能源的利用上,LED 成为全球关注的焦点。LED 是冷光源,光效高,工作电压低,耗电量小,体积小,可平面封装,易于开发轻薄型产品,结构坚固且寿命很长,光源本身不含汞、铅等有害物质,无红外和紫外污染,不会在生产和使用

收稿日期: 2011-08-29; **收到修改稿日期**: 2011-10-26; **网络出版日期**: 2012-01-12

基金项目: 国家 863 计划重点项目(2009AA01Z325)资助课题。

作者简介: 李亮(1985—),男,硕士研究生,主要从事 LED 封装与光学设计等方面的研究。

E-mail: ll3403mvp@163.com

导师简介: 金尚忠(1963—),男,教授,硕士生导师,主要从事光纤传感、LED 照明和光谱分析仪器等方面的研究。

E-mail: jinsz@cjlu.edu.cn

用中产生对外界的污染。因此,LED照明具有节能、环保和寿命长等优点。LED作为新型照明光源具有替代传统照明光源的极大潜力^[2~5]。

目前主要有两种技术途径来实现白光LED^[3,6]:通过红、绿、蓝(RGB)三基色LED芯片混光获得白光,或通过紫外或蓝光芯片激发荧光粉实现白光,且后者在白光LED封装技术上占据主导地位。对于荧光粉转换的白光LED,器件的光通量、色温、显色指数和颜色均匀性等评价参数的好坏决定了其所能应用的领域。

在白光LED封装的研究中,关于荧光粉层位置和封装的几何形状对LED器件光学特性的影响已经有了较深入的研究。研究表明,相比于传统的荧光粉直接涂覆在芯片上的封装方式,荧光粉层远离芯片的封装方式以及荧光粉层形状的改变能够提高LED的出光量^[7~9]。Sommer^[10,11]等研究认为荧光粉浓度、颗粒尺寸及荧光粉层厚度对白光LED器件的颜色均匀性有重要影响。为使荧光粉转换的白光LED具有高的显色性,研究人员主要通过改变荧光粉组构成^[12]或多基色荧光粉组合的封装方式^[13,14]实现高显色性。但是以上研究有些因为受到实际封装技术的限制,只是理论模拟上的研究,所得结果没有经过实际测试验证;有些只关心器件某一评价参数的改善和提高,没有对实现方法的稳定性做出深入的探讨。要实现荧光粉转换白光LED的广泛应用,产品的品质和可靠性是至关重要的。所以全面深入地研究影响器件品质和稳定性的因素是十分必要的。在诸多影响因素中,荧光粉的浓度和驱动电流强度尤为重要。基于以上所述原因,本文讨论了荧光粉的浓度和驱动电流强度对白光LED特性的影响。采用软件模拟和实际封装测试相结合的研究方法,对所得模拟结果同实际封装样品的测试结果进行了对比分析。

2 研究方法

2.1 模拟实验

用于光线追迹模拟所需物理模型如图1所示。采用荧光粉直接涂覆在芯片上的封装方法,对LED各部分设定精确的光学属性,以准确反映荧光粉浓度对LED特性的影响。各部分参数设定如下:封装胶的折射率为1.53,高折射率封装胶有利于芯片光能量出射;芯片中心波长为460 nm,波长半峰带宽(FWHM)为40 nm;芯片尺寸为1 mm×1 mm,放于反光杯中心位置,N-GaN层、多量子阱(MQW)层、P-GaN层从上到下依次沉积在Si基板上,Si基板上表面设定为高反射面。MQW层均匀辐射出光能量,各层的光学属性如表1所示^[7]。荧光粉模型采用一款实测的Ce:YAG荧光粉,中心粒径 D_{50} ,即体积累积分布中对应于50%的荧光粉粒径为11.600 μm ,粒径分布离散度 S 为0.785。

表1 LED芯片的光学属性

Table 1 Optical properties of the LED die

	N-GaN	MQW	P-GaN
Refractive index	2.42	2.54	2.45
Absorption coefficient / mm^{-1}	8	8	8

本模拟实验通过平均自由程(MFP)来表征荧光粉浓度。平均自由程是指光在传播过程中光子与荧光粉颗粒两次碰撞之间所通过距离的平均值。荧光粉的浓度越高,平均自由程越小。经三维光线追迹模拟,图2显示了荧光粉浓度对白光LED的光通量和相关色温(CCT)的影响。由图可知,随着荧光粉浓度的增加,即平均自由程的减小,光通量值先增大后减小,CCT值则一直下降。

对不同荧光粉浓度的白光LED,模拟实验也记录了光线经荧光粉层反射或散射入射到芯片的光通量值。所得结果如图3所示,随着荧光粉浓度的增加,即平均自由程的减小,入射到芯片的光通量增加。

2.2 封装实验

为了对荧光粉转换的白光LED特性做进一步研究,同时也为验证上述模拟结果,进行了实际的封装并对制得的封装样品做了测试。封装采用发光主波长范围为460~462.5 nm的小功率蓝光芯片和模拟中采用的Ce:YAG荧光粉,配置6种不同浓度荧光粉胶体样品,样品的掺杂浓度(质量分数)如表2所示。采用

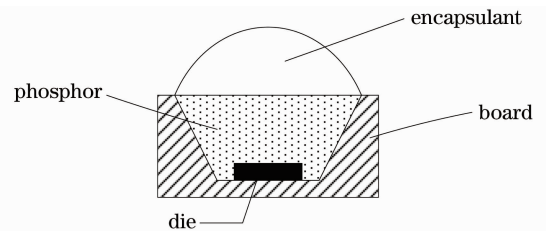


图1 白光LED封装结构示意图

Fig. 1 Schematic of white LED package

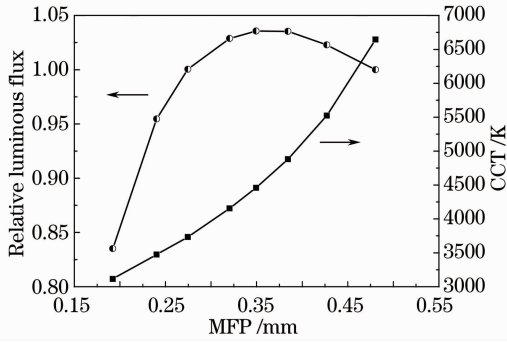


图 2 荧光粉浓度对 LED 出光量和 CCT 的影响

Fig. 2 Influence of phosphor concentration on luminous flux and CCT

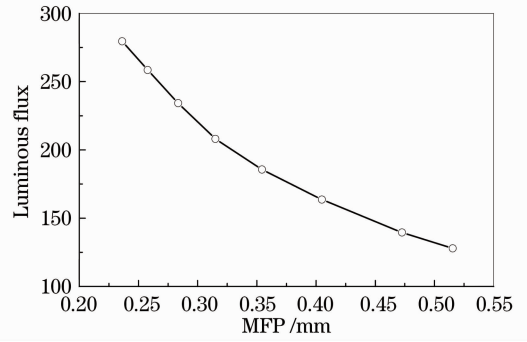


图 3 荧光粉浓度与入射芯片表面光通量关系

Fig. 3 Relation between phosphor concentration and luminous flux incident on the surface of LED die

LED 光电参数综合测试仪测试上述 6 组封装样品的相对光谱功率分布曲线、光通量(Φ)、显色指数(Ra)和相关色温(CCT)等光电参数。

表 2 六种不同浓度的荧光粉样品

Table 2 Samples of six different phosphor concentrations

Sample	01	02	03	04	05	06
Phosphor concentration (mass fraction) /%	8	11	14	17.5	21.5	26

图 4 给出了不同荧光粉浓度的白光 LED 封装样品在 30 mA 驱动电流强度下的光通量和 CCT 值。从图 4 可以看出,对于不同荧光粉掺杂浓度的样品,随着荧光粉浓度的增加,LED 出射光通量先增大后减小,CCT 值一直减小。这与模拟实验的结果相一致。

同时对 6 种不同荧光粉浓度的白光 LED 封装样品的节温进行了测试。对每种白光 LED 封装样品施加 10、20、30、50 mA 的驱动电流,分别测试不同驱动电流强度下的 LED 节温,测试结果如图 5 所示。测试结果表明 LED 节温随着驱动电流强度的增加而升高,而采用高荧光粉浓度封装的 LED 器件有相对高的节温。

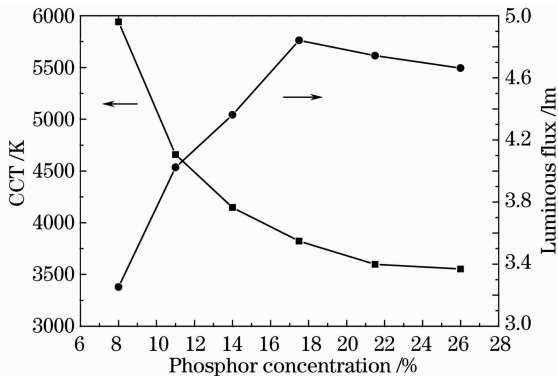


图 4 六种不同荧光粉浓度白光 LED 的光通量和相关色温

Fig. 4 Luminous flux and CCT results for the six LEDs of different phosphor concentration

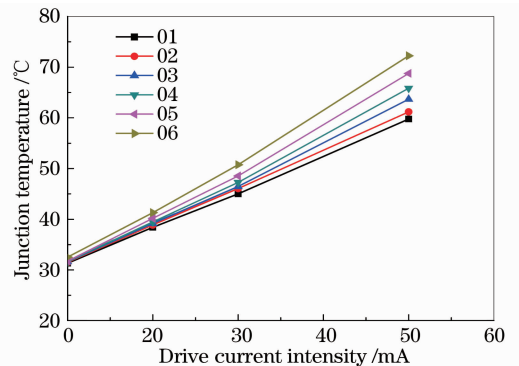


图 5 六种不同浓度白光 LED 驱动电流与芯片温度关系曲线

Fig. 5 Relation between drive current and junction temperature of the six LEDs of different phosphor concentration

图 6 给出了荧光粉浓度对白光 LED 显色指数(Ra)的影响。可以看出随着荧光粉浓度的增加,Ra 值逐渐减小;另外,采用 01~06 编号的 LED 封装样品的显色指数随着驱动电路流度变化有相同的变化趋势,即显色指数随着驱动电流强度的增加而升高并最终趋于稳定。

3 结果分析

荧光粉浓度对白光 LED 器件 CCT 和光通量的影响如图 2、图 4 所示。图 2 模拟结果显示,随着荧光粉

浓度的增加,即平均自由程的减小,CCT值呈下降趋势,白光LED器件偏于暖色调。CCT值的大小取决于光谱的能量分布。随着荧光粉浓度值的增大,增加了蓝光被荧光粉吸收的量,同时也伴随着更多的黄光被激发出来,导致黄-蓝光能量的相对比率变大。对于二基色白光光源,高的黄-蓝光比有低的CCT值,这是因为黄光相比蓝光有更低的CCT。由图4的实际封装测试结果也可得出同样的结论,即CCT随着荧光粉浓度的增加而减小,这说明模拟的结果是可信的。

相比于CCT随荧光粉浓度的增加而减小,光通量值则表现为随着荧光粉浓度的增加而先增大后减小,如图2、4所示。这种现象的产生主要和以下两个因素有关:1)光通量值和光波长有关系,光通量是按人眼对光波长的灵敏度来度量光的辐射功率;2)荧光粉层的陷光作用。当荧光粉浓度增加时,更多的蓝光被荧光粉吸收产生黄光。因为荧光粉发出的黄光相对于芯片发出的蓝光有更高的光视效能,所以蓝光转换为黄光使整个光谱的光视效能升高,LED的光通量值增大。但是,随着荧光粉浓度的增加,荧光粉层的陷光作用也会增加。当荧光粉浓度达到一定值以后,陷光在影响光通量上将起主导作用。这是因为荧光粉浓度增加使更多的光线(主要是黄光)被荧光粉散射或反射,从而也增加光被封装胶体、反光杯、芯片以及荧光粉自身吸收的概率。当陷光占主导作用时,光被吸收损耗的负面作用大于蓝黄光转换的正面作用,所以光通量值下降。如图4所示,实际的封装样品测试也显示了同样的结果。

图5给出了不同荧光粉浓度白光LED器件节温的差别。在相同驱动电流强度条件下,高的荧光粉浓度有高的节温。这是因为高浓度荧光粉相对于低浓度荧光粉有更强的陷光作用,更多的光被散射或反射回芯片被其吸收转化为热能,故高荧光粉浓度的器件节温相对高。同时节温的上升会使得芯片自身的量子效率和荧光粉的转换效率下降,导致LED的光通量下降。

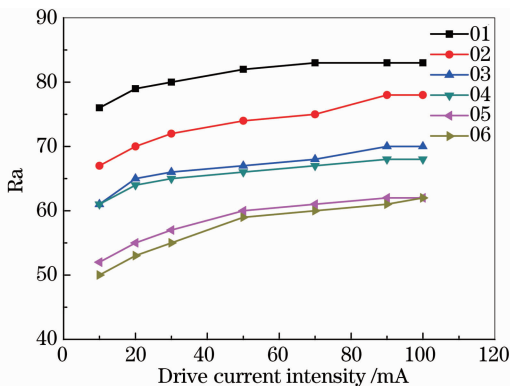


图6 六种不同质量分数白光LED驱动电流与显色指数关系曲线

Fig. 6 Relation between drive current and Ra of the six LED of different phosphor concentrations

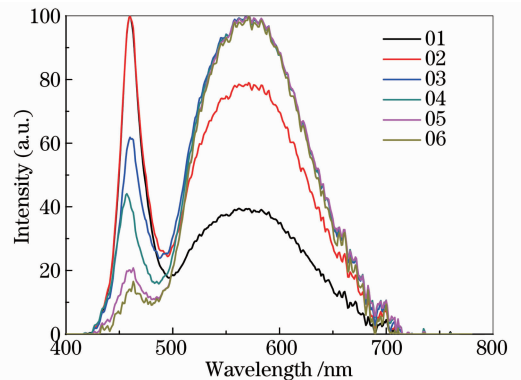


图7 六种不同质量分数白光LED光谱图(驱动电流30 mA)

Fig. 7 Spectra of six LED of different phosphor mass fraction (drive current 30 mA)

荧光粉浓度对白光LED器件显色指数的影响如图6所示。从图6可知,采用高浓度荧光粉封装的白光LED器件有低的显色指数。这是因为随着荧光粉浓度的升高,更多的蓝光被荧光粉吸收转换成黄光,黄-蓝光能量相对比率升高。在一个特定的体系中,光视效能和显色指数在一定程度上是相互制约的,相对于蓝光,黄光有更高的光视效能,所以高的荧光粉浓度会有相对低的显色指数。图7给出了采用不同浓度荧光粉封装LED器件的光谱功率分布。从图6还可得知,随着驱动电流强度的增加,LED的显色指数升高后趋于稳定。这是因为在可见光范围内,光源的光谱宽度越宽显色性越好,即显色指数越高。如图8、图9所示,随着驱动电流强度的增加,LED器件的光谱功率分布有一定的展宽,所以LED器件的显色指数升高。但是当驱动电流强度足够大时,LED器件光谱功率分布无明显变化,故显色指数趋于稳定。同时从图8可知,黄光的强度随着驱动电流强度增加先增大后减小。这是因为随着驱动电流强度增加,更多的蓝光从芯片出射,激发荧光粉产生更多的黄光;但是随着驱动电流强度的增加,LED器件芯片温度逐渐升高,使得荧光粉层温度同样升高,造成荧光粉的转换效率降低,黄光强度减弱。所以LED器件节温不宜过高。这也在一定程度上说明,当前二基色荧光粉转换白光LED在显色性上的提高是有限的。

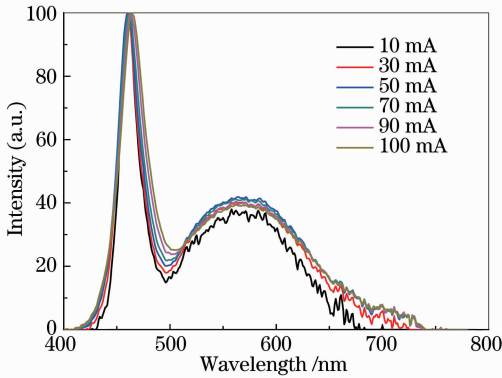


图 8 不同驱动电流下 01 号样品白光 LED 光谱图

Fig. 8 Spectrum of white LED No. 01 driven by different drive currents

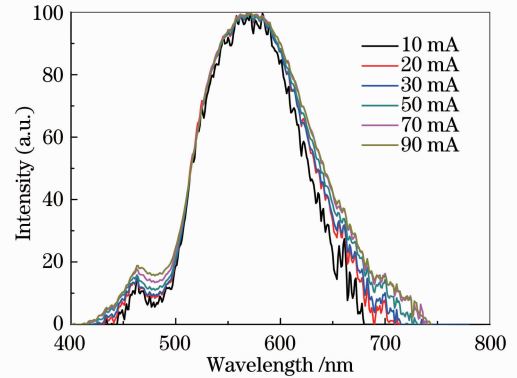


图 9 不同驱动电流下 06 号样品白光 LED 光谱图

Fig. 9 Spectra of white LED No. 06 driven by different drive currents

4 结 论

本文研究了荧光粉浓度及驱动电流强度对白光 LED 特性的影响。通过软件模拟实验和实际封装测试相结合的研究,得出以下结论:随着荧光粉浓度的增加,蓝光被大量吸收激发出更多黄光,黄-蓝光能量相对比率升高,使得 CCT 随着荧光粉浓度的增加而减小。荧光粉浓度增加使得蓝光被荧光粉充分吸收,激发出更多黄光,从而增加光通量输出,但是过高的荧光粉浓度会加剧荧光粉层的陷光,增加了吸收损耗的概率,造成光通量值下降。同时,由荧光粉浓度和驱动电流强度变化所引起的节温升高会降低荧光粉的转换效率。采用高浓度荧光粉封装的白光 LED 有相对低的显色指数,并且显色指数随着驱动电流强度的增加而升高,最终趋于稳定。

参 考 文 献

- Jin Ji, Yu Guiying, Lin Min. Research of high light collection efficiency of LED parabolic reflector based on non-imaging optics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 680~684
金 骥, 余桂英, 林 敏. 基于非成像光学的 LED 高收光率的抛物反射器研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 680~684
- E. Jones. Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination [M]. Washington: Optoelectronics Industry Development Association, 2001
- D. Steigerwald, J. Bhat, D. Collins *et al.*. Illumination with solid state light technology [J]. *IEEE J. Sel. Quantum Electron.*, 2002, **8**(2): 310~320
- E. Sehubert, J. Kim. Solid-state light sources getting smart [J]. *Science*, 2005, **308**(5274): 1274~1278
- Zhang Jiankun, Yang Yu, Chen Hongda. Modulation scheme analysis of indoor visible light communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405003
张建昆, 杨 宇, 陈弘达. 室内可见光通信调制方法分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405003
- A. A. Bergh. Blue laser diode (LD) and light emitting diode (LED) applications [J]. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2004, **201**(12): 2740~2754
- Zongyuan Liu, Shen Liu, Kai Wang *et al.*. Optical analysis of phosphor's location for high-power light-emitting diodes [J]. *IEEE Trans. Device and Materials Reliability*, 2009, **9**(1): 65~73
- Steven C. Allen, Andrew J. Steckl. A nearly ideal phosphor-converted white light-emitting diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(14): 143309
- Renyong Yu, Shangzhong Jin, Songyuan Cen *et al.*. Effect of the phosphor geometry on the luminous flux of phosphor-converted light-emitting diodes [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(23): 1765~1767
- Christian Sommer, Franz-Peter Wenzl, Paul Hartmann *et al.*. Tailoring of the color conversion elements in phosphor-converted high-power LEDs by optical simulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(9): 739~741
- Christian Sommer, Joachim R. Krenn, Paul Hartmann *et al.*. The effect of the phosphor particle sizes on the angular homogeneity of phosphor-converted high-power white LED light sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(4): 1181~1188

- 12 Bai Shengmao, Wang Jing, Miao Hongli *et al.*. Luminescence properties of the $Y_{3-x-y}Pr_xGd_yAl_5O_{12}:Ce^{3+}$ phosphors for white light emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1402~1405
白生茂, 王晶, 苗洪利等. 用于白光LED的 $Y_{3-x-y}Pr_xGd_yAl_5O_{12}:Ce^{3+}$ 荧光粉发光特性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1402~1405
- 13 Naoki Kimura, Ken Sakuma, Syunichiro Hirafune *et al.*. Extrahigh color rendering white light-emitting diode lamps using oxynitride and nitride phosphors excited by blue light-emitting diode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(5): 051109
- 14 Yu-Ho Won, Ho Seong Jang, Kyoung Woo Cho *et al.*. Effect of phosphor geometry on the luminous efficiency of high-power white light-emitting diodes with excellent color rendering property [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(1): 1~3