

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201503026



图案化基板 LED 中荧光粉 对光学性能的影响

张清梅^{1,2}, 朱大庆^{1,2}, 邹怀远^{1,2}

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用基板上加倒锥形图案化的新型封装方式,用蒙特卡洛光线追迹法仿真保形涂覆荧光粉体积比和厚度变化时,发光二极管(LED)光源光色品质的变化.仿真结果表明:LED光源的出光效率在图案化倾斜角 α 为 $30^\circ, 45^\circ$ 时,出光效率的提升量最大; α 为 45° 时,传统平面封装光源的空间颜色均匀性最大优化幅度分别为 $9.1\%, 8.4\%$;荧光粉厚度、体积比不变时,颜色均匀性相对于传统平面封装光源的优化幅度最大为 $11.1\%, 10.4\%$,光源的色温差值最大减小 $1\,006, 1\,319\text{ K}$;在厚度、体积比参数中任选一个进行优化,均可改善LED产品的颜色均匀性,而优化图案化结构可使空间颜色均匀性更明显地提高.

关键词: 荧光粉层; 图案化基板; 出光效率; 空间颜色分布

中图分类号: TN 312.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2017)05-0687-06

Influence of Phosphor Coating Layer to Optical Performance of LED With Patterned Board

ZHANG Qingmei^{1,2}, ZHU Daqing^{1,2}, ZOU Huaiyuan^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, Xiamen 361021, China)

Abstract: Effects of variations of conformal coating phosphors thickness and volume ratio on optical consistency of the new packaging light emitting diodes (LED) including the luminous and chromatic performance were simulated studied by Monte Carlo ray tracing method. The new packaging LED had a patterned board with regular invert cone structures. Simulation results revealed that a maximum light extraction efficiency improvement of the LED would achieve when the inclination angles of the invert cone structures were 30° and 45° . When $\alpha=45^\circ$, the largest improvement of angular color uniformity (ACU) compared to traditional planar packaging was 9.1% and 8.4% respectively. When the phosphor volume ratio and thickness were not changed, the largest improvement of ACU was 11.1% and 10.4% . When the thickness and the volume ratio of the phosphor layer changed, the correlated color temperature difference value of patterned structure LED was $1\,006, 1\,319\text{ K}$ lower than the LED with planar board. At this point, the patterned board has an obvious impact on the ACU of the LED. Optimization of phosphor layer thickness or volume ratio parameters can improve the light quality of LED packages. In the meantime, optimize the patterned structure can make the space color uniformity increase more obviously.

Keywords: phosphor coating layer; patterned board; light extraction efficiency; angular color uniformity

收稿日期: 2015-03-24

通信作者: 朱大庆(1966-),男,副教授,主要从事光学设计、LED照明技术的研究. E-mail: zhudaqing@hqu.edu.cn.
基金项目: 华侨大学高层次人才科研启动项目(09BS103);福建省光传输与变换重点实验室开放课题资助项目(2014202)

集成高功率发光二极管(LED)逐渐成为固体照明的发展趋势,白光LED的出光效率和空间颜色均匀性是业界关心的重要问题,而荧光粉涂覆工艺是影响LED光色品质的最重要因素^[1-2].为了提高LED光源的出光效率,Li等^[3]在平面基板上做图案化结构,破坏出光界面的全反射,使出光效率提高42%. Wu等^[4]在封装硅胶平面加微结构,出光效率理论上可以提高47%.为了有效提高封装光源的光色一致性,国内外研究人员做了许多工作. Sommer等^[5-6]建立保形涂覆荧光粉层的模型,讨论荧光粉层厚度、体积比等参数对空间色分布均匀性的影响. Liu等^[7-8]建立几种不同的封装模型,仿真计算不同结构封装的荧光粉层厚度和体积比、距离等参数对白光LED光色品质的影响,得出荧光粉和芯片的发光形式相近时出光均匀性最佳. 本文采用基板上加倒锥形图案的新型封装结构,进行光学仿真(Lightools 8.0),研究图案化结构的LED中,荧光粉层参数对光源出光效率及空间颜色分布均匀性的影响.

1 仿真模型的建立

对图案化结构的COB封装的白光LED光色品质进行研究. 封装光源芯片排列为 3×3 阵列,中心间距6 mm,芯片模型为 $1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 的GaN蓝光芯片. 有图案的基板尺寸为 $22 \text{ mm} \times 22 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,表面反射率为0.90. 基板表面添加的倒锥形结构半径为0.5 mm,锥形开口朝上,顶点间距为0.75 mm. 保形涂覆荧光粉层的材料为YAG:Ge和硅胶的混合物. 由Mie散射理论,设荧光粉颗粒直径为 $15 \mu\text{m}$ 的球体,荧光粉层折射率为1.63. 在距发光面316 mm处,设置片状接收器,每相邻的片状接收器角度间隔 5° ,分析各个角度接收面上的光线信息.

光线追迹过程中,仿真得出LED的出光效率和黄蓝光比(YBR). 采用空间 $\pm 65^\circ$ 范围内的最小YBR($R_{\text{YB},\text{min}}$)和最大YBR($R_{\text{YB},\text{max}}$)的比值 U_c 评价LED的空间颜色均匀性^[9-11],即

$$U_c = R_{\text{YB},\text{min}}/R_{\text{YB},\text{max}}. \quad (1)$$

用相同荧光粉厚度、体积比变化范围内,色温最大值与最小值的差值 ΔT_{CC} 描述图案化结构LED中荧光粉参数变化的影响,即

$$\Delta T_{\text{CC}} = T_{\text{CC},\text{max}} - T_{\text{CC},\text{min}}. \quad (2)$$

2 结果与讨论

美国能源之星的固态照明灯具标准将白光LED分为8种色型^[12],讨论不同结构光源的荧光粉体积比及厚度变化对光色品质的影响.

2.1 出光效率的影响因数分析

分析倾斜角度为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 55^\circ$ 时,倒圆锥形结构光源的出光效率随体积比和厚度的变化情况. 其中, 0° 表示无图案封装. 试验采用2种方法:方法1为平面基板加图案化结构;方法2为带反光杯阵列基板图案化. 当 α 为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 55^\circ$ 时,荧光粉的厚度(h)、体积比变化对出光效率(η)的影响,如图1,2所示. 以色温在 $3\,000 \sim 9\,700 \text{ K}$ 范围内的封装做进一步分析. 图1中:体积比为1.59%;厚度为 $0.07 \sim 0.25 \text{ mm}$. 图2中:厚度为 0.1 mm ;体积比为 $1.06\% \sim 2.30\%$.

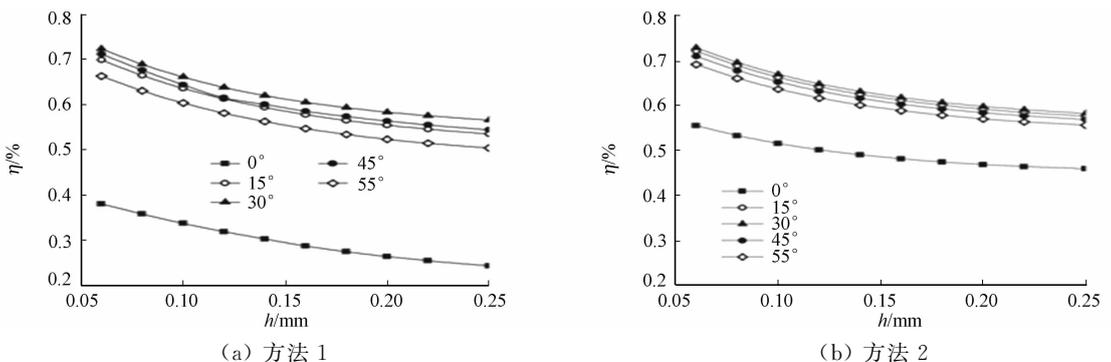


图1 荧光粉厚度变化对出光效率的影响

Fig. 1 Influence of phosphor thickness on luminous efficiency

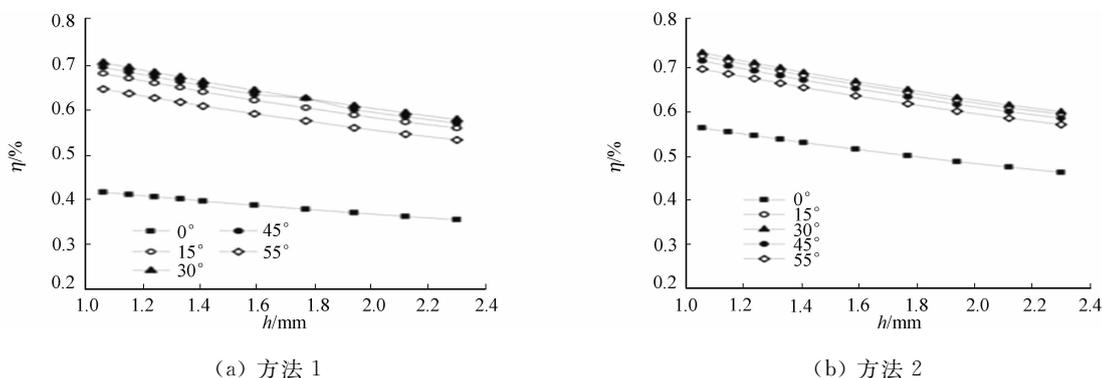


图 2 荧光粉体积比变化对出光效率的影响

Fig. 2 Influence of phosphor volume ratio on luminous efficiency

由图 1, 2 可知: 对不同的图案参数, LED 的出光效率随厚度和体积比的变化是一致的, 均高于不加图案化的结构; 当 α 为 30° 时, 方法 1 与方法 2 的出光效率均达到最高^[10]; 方法 2 的出光效率受体积比和厚度的影响较小。

当厚度和体积比增加时, 由于荧光粉层的散射作用增强, 所有结构的出光效率呈下降趋势, 且荧光粉厚度和体积比较大时, 荧光粉对蓝光的吸收转换作用加强, 转换过程有较高的能量损失。因此, 厚度和体积比较大时, 出光效率变化趋势逐渐变缓。对于不加图案化结构封装光源, 出光效率随厚度或体积比变化的提升量均最小, 当角度取 $30^\circ, 45^\circ$ 时, 其出光效率提升量最大, 最高可达 16.5%, 光线出射的概率最高。

对比仿真结果可知: 对于无图案结构封装, 在荧光粉体积比和厚度变化范围内, 均会导致较大的色温差值, 且对于方法 1, 荧光粉参数变化对色温差值的影响较明显。当倾斜角 α 为 $30^\circ, 45^\circ$ 时, 在 0.07~0.25 mm 厚度变化范围内, 色温差值可分别减少 1 006, 405 K; 在 1.06%~2.30% 体积比变化范围内, 色温差值分别减少 1 319, 424 K; 此倾斜角封装结构下的 LED 光源色温波动范围最小。由此可知: 图案化结构可以减弱荧光粉涂层体积比和厚度变化对色温波动的影响。

2.2 空间颜色分布的影响因数分析

LED 产品性能包括光效和空间颜色分布。在仿真过程中, 荧光粉层厚度取 70, 100, 150 μm , 体积比取 1.15%, 1.59%, 2.30%, 通过控制荧光粉的厚度及体积比, 使其色温保持在 6 500(冷白), 5 000(正白), 3 500(暖白) 等 3 个色品区域, 讨论不同图案化结构参数下的 LED 空间颜色分布均匀性。

2.2.1 荧光粉厚度 荧光粉厚度变化对不同图案化结构光源空间颜色均匀性的影响, 如图 3, 4 所示。图 3, 4 中: θ 为基板上倒锥形图案结构的倾斜角度。当荧光粉厚度增加, 所有封装结构的 YBR 值都会增大, 相应的 LED 的颜色也将偏向暖白光, 空间颜色均匀度随荧光粉厚度的增加而变低。

当荧光粉厚度为 0.07, 0.10 mm 时, 颜色分布曲线基本上是以平移的方式变化。此时, 荧光粉的厚度改变, 对空间颜色的均匀度影响较小。当荧光粉厚度增大时, 荧光粉的吸收和散射作用增强, 导致整个空间的 YBR 指数升高。

由图 3 可知: 对于方法 1, 由于芯片的蓝光呈朗伯分布, 中心角度处的 YBR 低于边缘角度的 YBR, 空间颜色分布曲线出现波谷; 图案化结构破坏出光界面全反射后, 黄光受全反射的影响较蓝光大, 出射概率的提高量大于蓝光, 中心角度的 YBR 形成的波谷逐渐平缓; 当 α 为 45° 时, 厚度的增加使中心角度的 YBR 逐渐逼近边缘角度的 YBR, 此时, 当荧光粉厚度为 0.07 mm, 空间颜色均匀性为 85.3%, 相对于传统平面封装 LED 光源有所提高。

由图 4 可知: 对于方法 2, 当荧光粉厚度为 0.07, 0.10 mm 时, 颜色分布曲线表现出类似于平面封装的变好趋势。当荧光粉厚度为 0.15 mm 时, 颜色分布曲线出现明显的波峰波谷, 加上图案化结构以后, 波峰和波谷均在逐渐的削弱; 当厚度为 0.07 mm, α 为 45° 时, 颜色均匀性为 83.1%, 比无图案化结构优化 7.62%。

由此可知: 加图案化结构的均匀性均高于无图案化结构, 带反光杯阵列结构的均匀性高于平面封装结构。对于传统平面封装光源, 颜色均匀性最大优化幅度为 9.1%; 而平面封装结构中, 当荧光

粉层厚度为 0.15 mm, α 为 45° 时, 颜色均匀性相对于传统平面封装光源优化幅度最大为 11.1%。对于带反光杯阵列光源结构, 颜色均匀性变化幅度为 7.1%; 加图案化结构后, 荧光粉层厚度为 0.15 mm, α 为 45° 的情况下, 最大变化幅度为 7.62%。因此, 相对于改变荧光粉层厚度参数, 使用图案化结构封装能更大程度地优化 LED 光源的空间颜色分布。

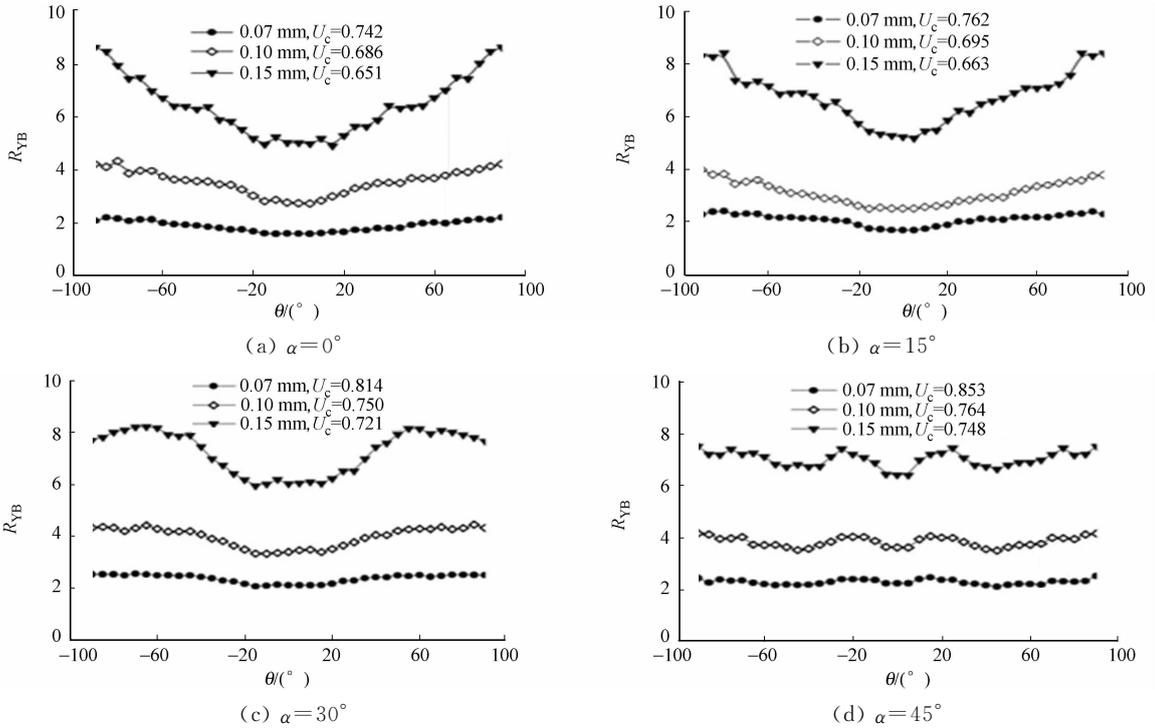


图 3 荧光粉厚度变化对光源颜色分布的影响(方法 1)

Fig. 3 Influence of phosphor thickness on distribution of light source color (method 1)

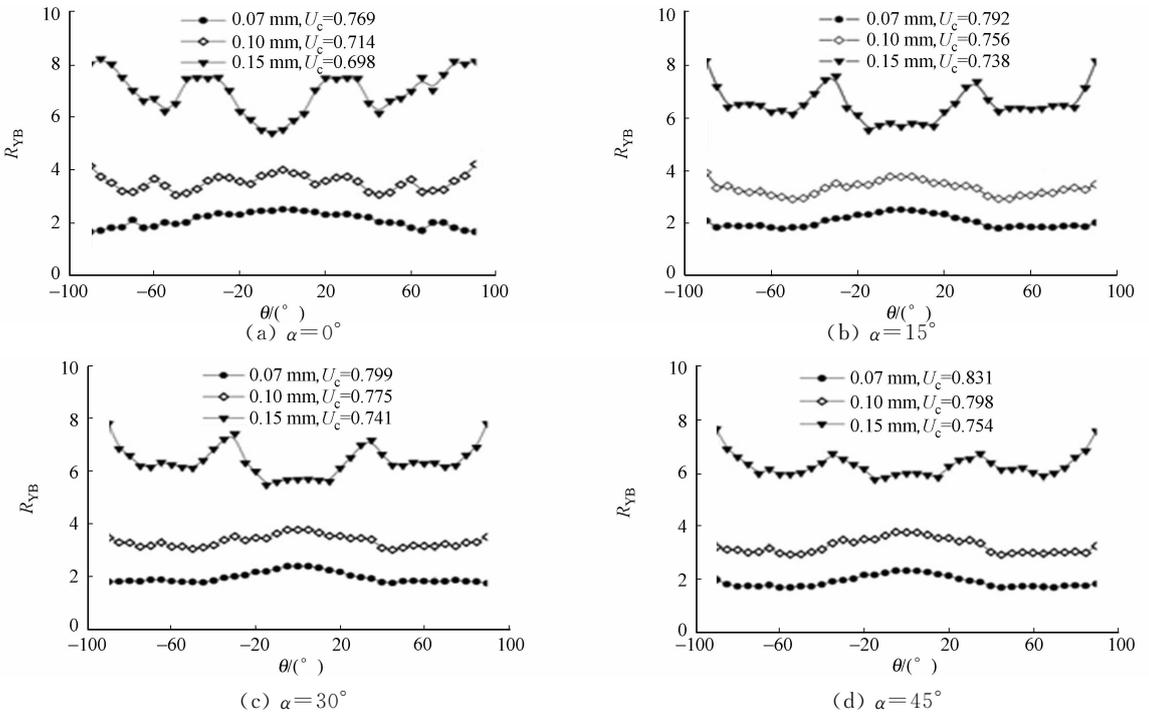


图 4 荧光粉厚度变化对光源颜色分布的影响(方法 2)

Fig. 4 Influence of phosphor thickness on distribution of light source color (method 2)

2.2.2 荧光粉体积比 荧光粉体积比变化对不同图案化结构光源空间颜色均匀性的影响, 如图 5, 6 所示。荧光粉体积比增加对空间颜色均匀性的改善作用与荧光粉的厚度增加的影响基本一致。

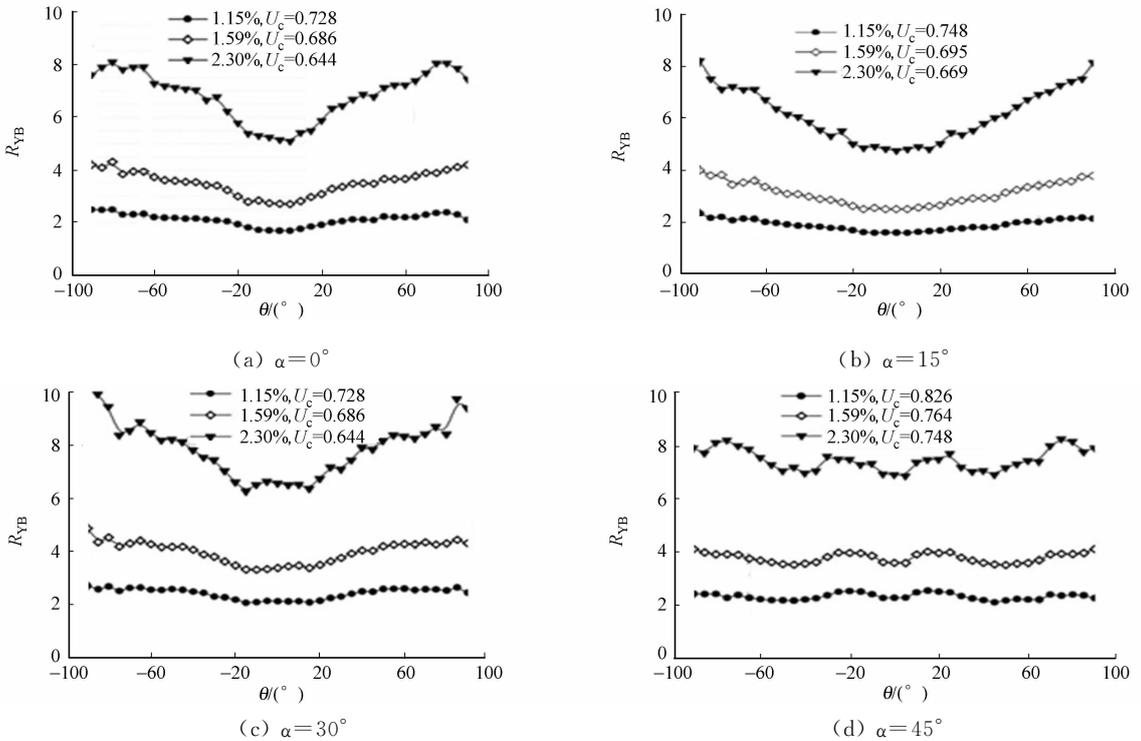


图 5 荧光粉体积比变化对光源颜色分布的影响(方法 1)

Fig. 5 Influence of phosphor volume ratio on distribution of light source color (method 1)

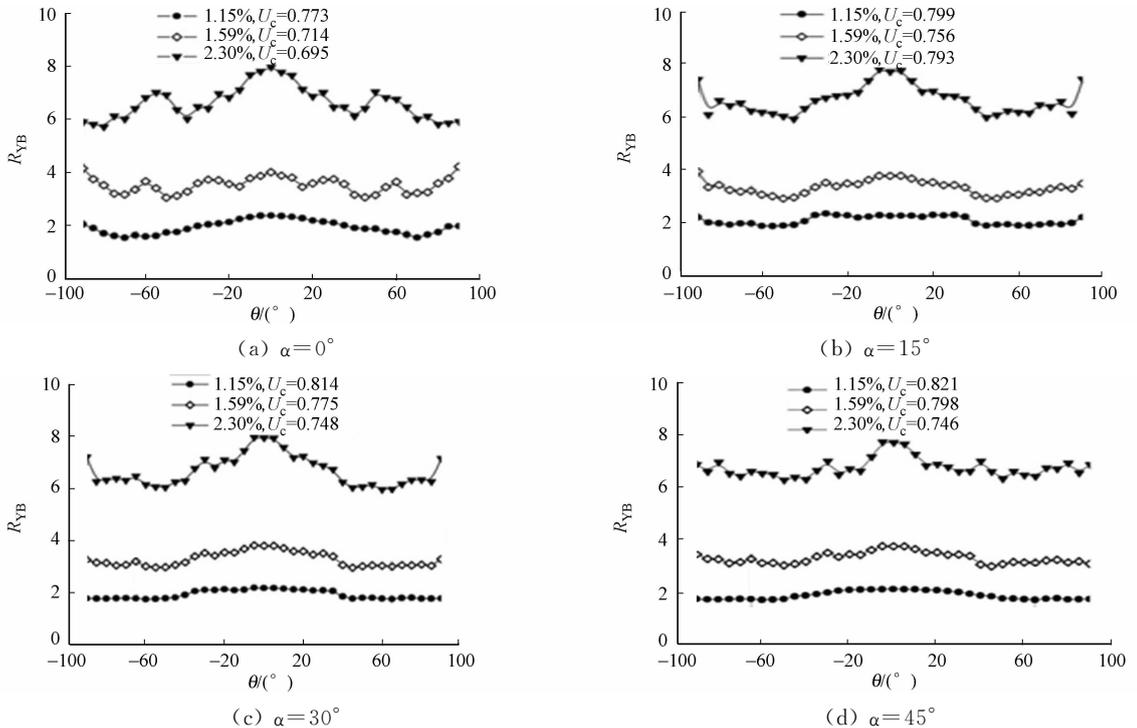


图 6 荧光粉体积比变化对光源颜色分布的影响(方法 2)

Fig. 6 Influence of phosphor volume ratio on distribution of light source color (method 2)

由图 5 可知:当荧光粉的厚度为 0.15 mm, α 为 45° 时,不同体积比荧光粉封装的颜色均匀性分别为 82.6%, 76.4%, 74.8%;对于带反光杯基板加图案化结构光源,当 α 为 45° 时,不同体积比下的颜色均匀性分别为 82.1%, 79.8%, 74.6%, 此时的空间颜色均匀性均高于其他角度的封装结构.在上述荧光粉体积比变化范围内,平面图案化封装结构情况下,颜色均匀性可提高 8.4%;当体积比为 2.30%, α 为 45° 时,图案化结构可使空间颜色分布最大提高 10.4%.

由图 6 可知:上述体积比变化范围内的空间颜色均匀性提高 7.8%;当体积比为 2.30%, α 为 45°

时,颜色均匀性提高 5.3%。因此,优化荧光粉的参数也可以提高 LED 光源的空间颜色均匀性。

总之,在厚度或者体积比参数中任选一个进行优化,均可在一定程度上改善 LED 产品的颜色均匀性。采用优化的图案化结构参数,空间颜色均匀性可以得到更大地提高。

3 结束语

通过仿真分析,分别讨论在平面基板和带反光杯阵列封装基板上加倒锥形图案化结构的新型封装结构,保形涂覆荧光粉层体积比和厚度发生变化,对出光效率和空间颜色分布的影响。由仿真结果可知,基板加图案化结构光源出光效率均高于不加图案化的结构。在厚度或者体积比参数中任选一个进行优化,而优化图案化结构使空间颜色均匀性更明显提高。荧光粉体积比和厚度较大时,图案化结构对光源的空间颜色分布的作用更明显。图案化结构基板封装将有利于提高光源出光效率和空间颜色一致性,弱化荧光粉涂层生产工艺的误差对颜色分布的影响,提高 LED 封装产品的光色性能,从而降低生产过程中的成本。

参考文献:

- [1] KIM J K, LUO H, SCHUBERT E F, *et al.* Strongly enhanced phosphor efficiency in GaInN white light-emitting diodes using remote phosphor configuration and diffuse reflector cup[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(21): L649-L651.
- [2] 刘志彬, 钱可元, 罗毅, 等. 荧光粉层形状对白光 LED 空间色温均匀性的影响[J]. 半导体光电, 2012, 33(5): 651-656.
- [3] LI Zongtao, WANG Qinghui, TANG Yong, *et al.* Light extraction improvement for LED COB devices by introducing a patterned leadframe substrate configuration[J]. Transactions on Electron Devices, 2013, 60(4): 1397-1403.
- [4] WU Dan, WANG Kai, LIU Sheng. Enhancement of light extraction efficiency of multi-chips light-emitting diode array packaging with various microstructure arrays[C]// 61st Electronic Components and Technology Conference, Florida: IEEE Press, 2011: 242-245.
- [5] SOMMER C, HARTMANN P, PACHLER P, *et al.* A detailed study on the requirements for angular homogeneity of phosphor converted high power white LED light sources[J]. Optical Materials, 2009, 31(6): 837-848.
- [6] SOMMER C, WENZL F P, HARTMANN P, *et al.* Tailoring of the color conversion elements in phosphor-converted high-power LEDs by optical simulations[J]. Photonics Technology Letters, 2008, 20(9): 739-741.
- [7] LIU Zongyuan, WANG Kai, LUO Xiaobing, *et al.* Precise optical modeling of blue light-emitting diodes by Monte Carlo ray-tracing[J]. Optics Express, 2010, 18(9): 9398-9412.
- [8] LIU Zongyuan, LIU Sheng, WANG Kai, *et al.* Studies on optical consistency of white LEDs affected by phosphor thickness and concentration using optical simulation[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2010, 33(4): 680-687.
- [9] ZHENG Huai, FU Xing, HU Run, *et al.* Angular color uniformity improvement for phosphor-converted white light-emitting diodes by optimizing remote coating phosphor geometry[C]// 13th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging. Guilin: IEEE Press, 2012: 1483-1486.
- [10] 张清梅, 朱大庆. 图案化基板对集成封装 LED 的光色品质的影响[J]. 发光学报, 2014, 35(10): 1276-1282.
- [11] LIU Zongyuan, LIU Sheng, WANG Kai, *et al.* Optical analysis of phosphor's location for high-power light-emitting diodes[J]. Device and Materials Reliability, 2009, 9(1): 65-73.
- [12] 赵敏, 张万生. 白光 LED 色温漂移的研究[J]. 半导体技术, 2010, 35(9): 214-218.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)