

## 激光与光电子学进展

## 远程荧光粉与芯片的间距对白 LED 性能的影响

郑雪<sup>1</sup>, 徐智谋<sup>1\*</sup>, 隆宇波<sup>1</sup>, 陈军平<sup>2</sup>, 刘新高<sup>3</sup><sup>1</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;<sup>2</sup>深圳市强流光电有限责任公司, 广东 深圳 518104;<sup>3</sup>深圳市光优光电科技有限公司, 广东 深圳 518108

**摘要** 荧光粉转换白光 LED 具有高能效、低成本、长寿命等优势, 广泛应用于照明领域, 提高荧光粉转换白光 LED 的光效一直是该领域的研究热点。为了对白 LED 的高性能封装进行设计优化和制备, 采用模拟仿真以及实验测试相结合的方式, 对 LED 芯片封装进行研究分析, 采用了特制支架和双芯片封装, 提高灯珠光效, 在此基础上, 改进了荧光粉涂覆工艺, 提高了荧光粉激发效率, 整体提高 LED 光效约 6%, 且研究了远程荧光粉与芯片的距离变化时 LED 的光效变化。

**关键词** 光学设计; 白光发光二极管; 远程荧光粉; Light Tools 仿真

中图分类号 O435 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213238

## Influence of Distance Between Remote Phosphor and Chip on Performance of White LEDs

Zheng Xue<sup>1</sup>, Xu Zhimou<sup>1\*</sup>, Long Yubo<sup>1</sup>, Chen Junping<sup>2</sup>, Liu Xingao<sup>3</sup><sup>1</sup>School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;<sup>2</sup>Shenzhen Stronglumen Optoelectronic Co., Ltd, Shenzhen 518104, Guangdong, China;<sup>3</sup>Shenzhen Guangyou Optoelectronic Technology Co., Ltd., Shenzhen 518108, Guangdong, China

**Abstract** Phosphor-converted white LEDs have the advantages of high energy efficiency, low cost, and long life. They are widely used in lighting area. Improving the luminous efficiency of phosphor-converted white LEDs has always been a research hotspot. In order to design and optimize the high-performance packaging of white LEDs, combination of simulations and experiments are used to research and analyze LED chip packaging. We use a special bracket and dual-chip package to increase luminous efficiency. On this basis, the phosphor coating process is improved, the phosphor excitation efficiency is improved, and the overall LED luminous efficiency is increased by about 6%. This study also investigates the change in LED luminous efficiency when the distance between the remote phosphor and chip changes.

**Key words** optical design; white light emitting diode; remote phosphor; Light Tools simulation

## 1 引言

近年来, 发光二极管 (Light emitting diode, LED) 作为新一代绿色光源被普遍用于照明<sup>[1-3]</sup>、显示器<sup>[4]</sup>、医疗服务<sup>[5]</sup>、植物生长<sup>[6-7]</sup>和光通信<sup>[8-9]</sup>等领域。与传统光源相比, LED 作为环境友好型固态照明光源具备很多优点<sup>[10-11]</sup>。2010 年 Cree 公司宣布其白光 LED 光效远超传统的白炽灯和荧光灯, 且白光 LED 的制造成本不

断降低, 从此白光 LED 技术进入飞速发展阶段<sup>[12-13]</sup>。

自然界中看到的白光并非单色光, 而是多种单色光混合而成的复合光, 因此白光 LED 也需要复合多种单色光。目前, 主要可以通过 RGB 三芯片组合法<sup>[14-18]</sup>、荧光转换法<sup>[19-20]</sup>和量子阱法实现白光 LED, 其中, 荧光转换法中的蓝光芯片激发黄光荧光粉发光的方式<sup>[21-22]</sup>工艺成熟度高、生产成本相对较低, 因此荧光粉转换白光 LED (Phosphor-converted white LED,

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2022-02-04; 录用日期: 2022-02-21; 网络首发日期: 2022-02-31

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0403401)

通信作者: \*xuzhimou@mail.hust.edu.cn

PC-WLED)是制造白光LED的主流方式。

白光LED由有源层发光然后逸出芯片,最终通过封装结构到达空气,然而在这一过程中,材料内部的吸收、菲涅耳损失、全反射损失、封装材料对芯片发出的短波长光的影响以及荧光粉层斯托克斯转换和荧光淬灭等因素<sup>[23-25]</sup>,严重影响了LED的光效。在有限的成本范围内改进封装技术尽可能地提高光效,从而实现高光效、高显色性、空间颜色分布均匀的白光LED是大功率LED研发的主要目标。国内外学者通过研究报道证实了荧光粉与芯片分离的远程封装方式可以有效提高白光LED器件的光效<sup>[26-28]</sup>,远程荧光技术是白光LED封装的发展趋势。

本研究采用特制支架和双芯片封装方式结合远程荧光粉技术来提升LED灯具光效。1)封装结构方面:采用大出光角特殊支架,同时减小芯片与反射层距离,增强光的反射,使用并联双芯片封装方式;2)封装工艺方面:采用远程荧光粉技术,整体使LED颗粒光效提高6%。在此基础上,本研究还通过模拟仿真和实验测试相结合的方式,探讨了荧光粉与芯片之间涂覆底胶的厚度在19~107 μm范围内变化时,厚度对LED光学性能的影响。

## 2 仿 真

传统的白光LED封装方式如图1(a)所示,将荧光粉与封装胶的混合物直接滴涂在芯片表面,但这种工艺会导致部分散射光损失,不利于提升LED光效,本研究采取新型封装方式即远程荧光技术以解决这些问题。如图1(b)所示,采用蓝光LED芯片激发黄色荧光粉发光,复合后得到白光,其中荧光粉层远离芯片放置,能有效减少芯片工作时的热量传递,防止荧光粉层的光转换效率由于温度升高而降低,即相当于提高了荧光粉层的光转换效率;同时,远程荧光粉可以明显降低荧光粉到芯片的后散射概率,减少被荧光粉散射回芯片的光子数量,从而提高LED的光效。对远程荧光粉封装技术的探究,主要是探究LED芯片与荧光粉层之间距离 $h$ 对光效的影响,即探究封装工艺中底部封装胶的厚度 $h$ 对最终光效的影响,如图1(b)中所示。

Light Tools仿真是以蒙特卡罗方法为基础,对目

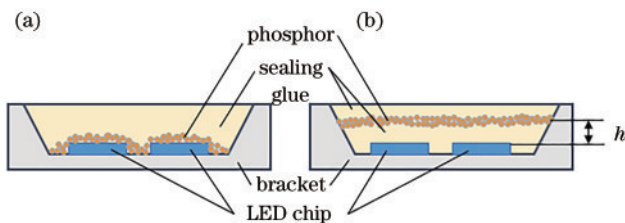


图1 白光LED截面示意图。(a)传统荧光粉;(b)远程荧光粉  
Fig. 1 Schematic cross-sectional view of white LED. (a) With conventional phosphor; (b) with remote phosphor

标光线进行追迹的三维光学系统建模软件,追迹方向可指向空间中的任意角度,然后在指定的接收器上收集这些光线发出的能量,得到指定表面上的照度、光强、亮度等参数,模拟分析光束在介质中的传输,精度高且几何光路追迹精确。本研究采用Light Tools仿真软件对远程荧光粉与芯片的距离对白光LED光学性能的影响进行探究。在Light Tools中建立的3D模型如图2所示,将2个LED芯片简化为2个点光源,每个点光源的光通量都是679.55 lm,支架简化为2 μm厚镀银反射层,出光角度设置为133.6°/116.9°,荧光粉厚度设置为30 μm,荧光粉的激发波段为450~455 nm,封装胶的折射率为1.56,封装胶(顶胶)厚度固定为150 μm,封装胶(底胶)厚度(即LED芯片到荧光粉层的距离 $h$ )设置为20~100 μm,以20 μm为梯度变化设置5组参数。探测器设置在距离模型1 mm的位置,网格像素为100 pixel×100 pixel。

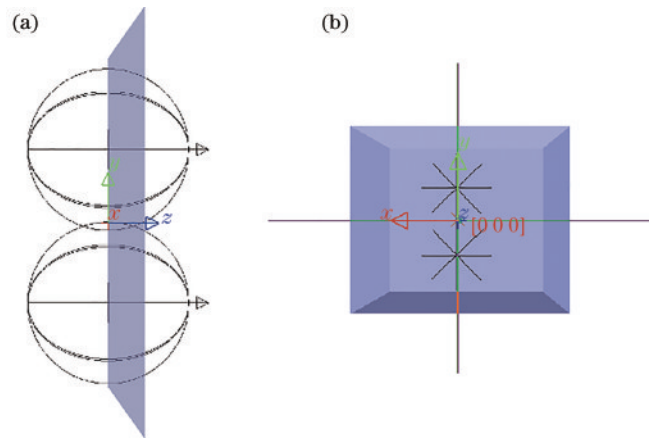


图2 仿真3D模型。(a)侧视图;(b)俯视图

Fig. 2 Simulation 3D model. (a) Side view; (b) top view

主要探讨远程荧光粉层到LED芯片的距离 $h$ 对白光LED光学性能的影响,模拟设计了5组仿真对比实验, $h$ 分别设置为20、40、60、80、100 μm。在对光学模型进行大量光线追迹模拟后,仿真分析结果如图3~图7所示。

图3(a)~图7(a)分别对应 $h$ 为20、40、60、80、100 μm时的光强度分布, $L=0^\circ$ 和 $L=90^\circ$ 为两个不同平面内的光强分布。 $L=0^\circ$ 表示与荧光粉层平行的平面内的光强分布图; $L=90^\circ$ 表示与荧光粉层垂直的平面内的光强分布图。图3(b)~图7(b)的左侧部分分别对应 $h$ 为20、40、60、80、100 μm时的光功率密度分布,右侧部分为色度条,其中, $X$ 和 $Y$ 为照射范围。由图3~图7可知,光斑中心的光照均匀分散。

Light Tools的5组仿真结果具体数据,如表1所示。其中,光源的总光通量为1359.1 lm。由表1可知,当 $h$ 为20 μm时,灯珠模型输出的光通量为1179.9 lm;当 $h$ 分别为40、60、80、100 μm时,灯珠模型输出的光通量分别为1230.3、1249.4、1260.0、1262.2 lm,通过

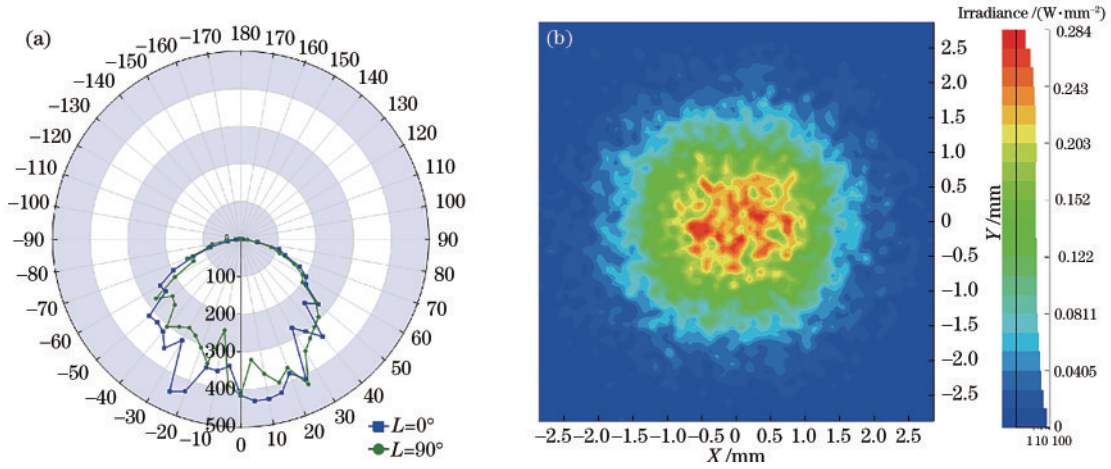


图 3  $h=20\ \mu\text{m}$  时的仿真结果。(a) 光强度分布；(b) 光功率密度分布

Fig. 3 Simulation results when  $h$  is  $20\ \mu\text{m}$ . (a) Light intensity distribution; (b) optical power density distribution

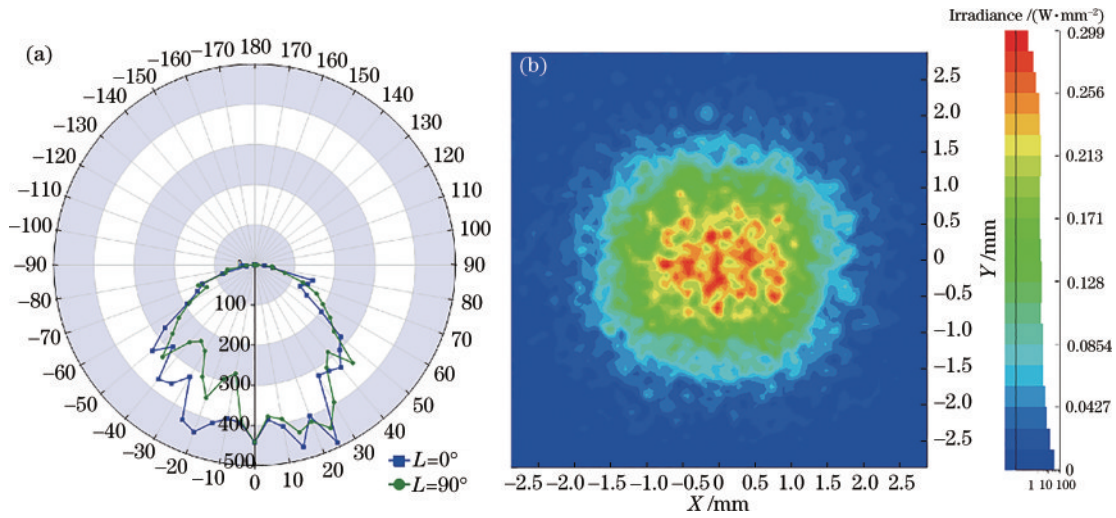


图 4  $h=40\ \mu\text{m}$  时的仿真结果。(a) 光强度分布；(b) 光功率密度分布

Fig. 4 Simulation results when  $h$  is  $40\ \mu\text{m}$ . (a) Light intensity distribution; (b) optical power density distribution

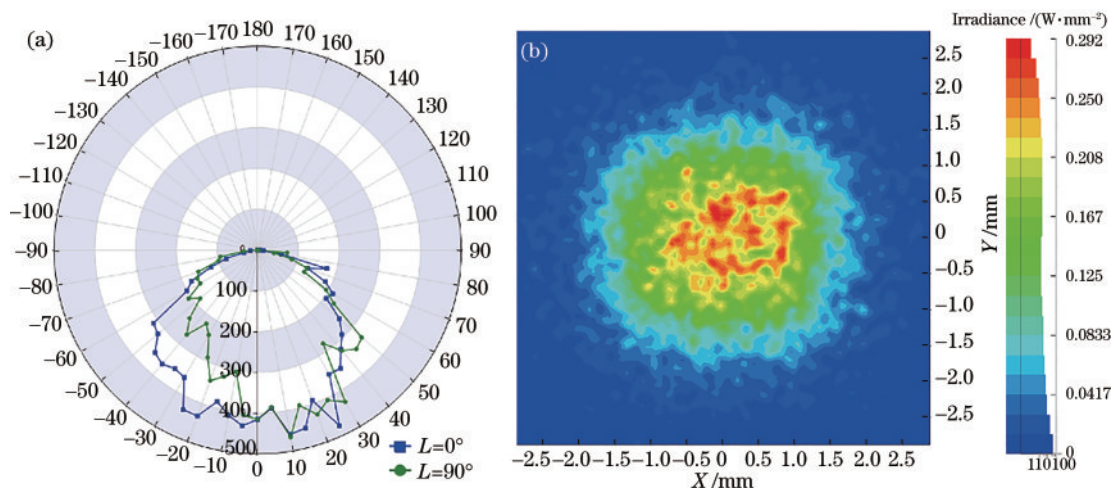


图 5  $h=60\ \mu\text{m}$  时的仿真结果。(a) 光强度分布；(b) 光功率密度分布

Fig. 5 Simulation results when  $h$  is  $60\ \mu\text{m}$ . (a) Light intensity distribution; (b) optical power density distribution

计算得到这 5 组模型的光转换效率分别为 0.86815、0.90523、0.91928、0.92708、0.92870。 $h$  为  $100\ \mu\text{m}$  与

$h$  为  $20\ \mu\text{m}$  相比较得出, 光转换效率提升了约 6 个百分点, 最大光强度提升了约 9%。

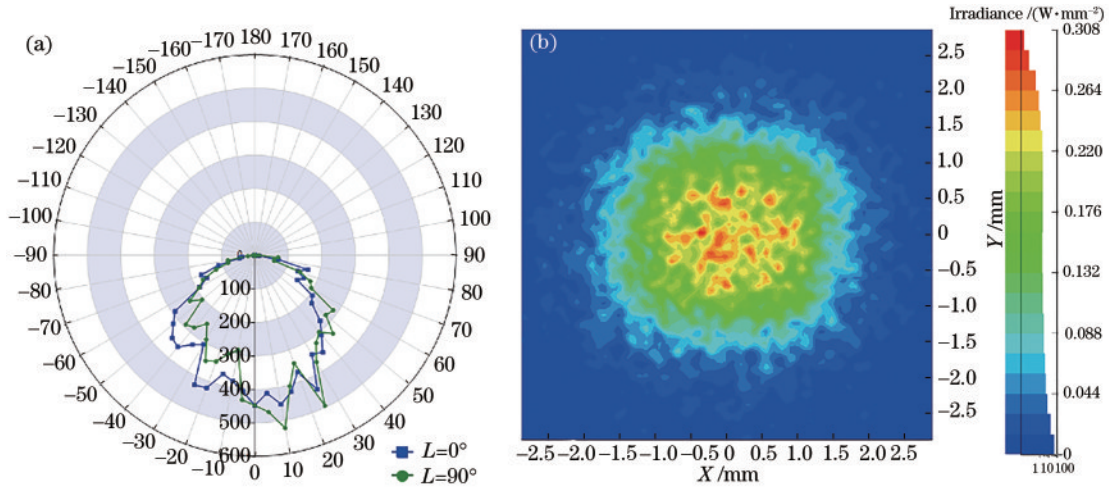


图 6  $h=80\ \mu\text{m}$  时的仿真结果。(a) 光强度分布; (b) 光功率密度分布

Fig. 6 Simulation results when  $h$  is  $80\ \mu\text{m}$ . (a) Light intensity distribution; (b) optical power density distribution

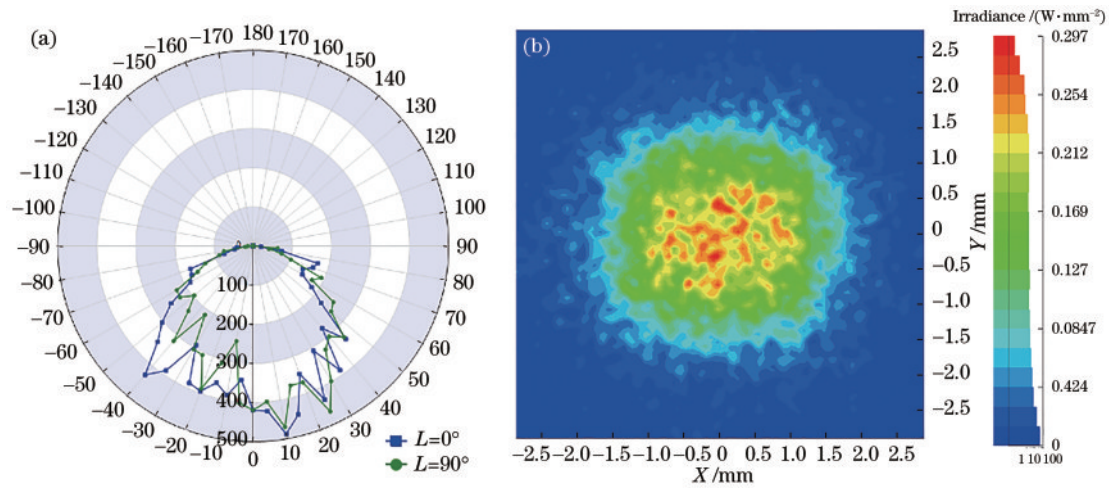


图 7  $h=100\ \mu\text{m}$  时的仿真结果。(a) 光强度分布; (b) 光功率密度分布

Fig. 7 Simulation results when  $h$  is  $100\ \mu\text{m}$ . (a) Light intensity distribution; (b) optical power density distribution

表 1 Light Tools 仿真结果

Table 1 Simulation results of Light Tools

$h / \mu\text{m}$	Maximum light intensity / cd	Total power / lm	Efficient
20	513.78	1179.9	0.86815
40	531.48	1230.3	0.90523
60	528.79	1249.4	0.91928
80	548.68	1260.0	0.92708
100	561.24	1262.2	0.92870

### 3 实验方法与测试结果

#### 3.1 特制支架的设计

本研究特别设计了 LED 芯片封装支架,如图 8 所示。与传统的 LED 芯片支架相比较,改进了出光角度、芯片与反射层距离、芯片连接方式等方面,具体改进点如表 2 所示。其中,芯片尺寸的变化使芯片的间隙增大。

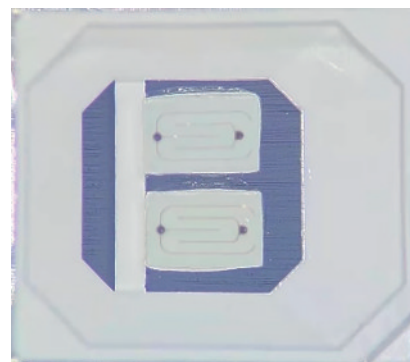


图 8 特制支架示意图

Fig. 8 Schematic diagram of special bracket

#### 3.2 LED 封装流程

LED 的封装流程图如图 9 所示。首先,将密集排列的晶片分开,以便于后续的固晶工艺,同时对固晶胶进行解冻和搅拌,并对特制支架进行等离子清洗和  $120\ ^\circ\text{C}$  预热 1 h 操作,预热后的支架放干燥箱,且需在 4 h 内完成固晶操作;其次,通过导热胶将晶片

表 2 特制支架与传统支架的对比

Table 2 Comparison between special bracket and traditional bracket

Point of improvement	Traditional bracket	Special bracket
Light angle / (°)	92/92	133.6/116.9
Distance between chip and reflective layer /mm	0.76	0.5
Thickness of silver plating / $\mu\text{m}$	0.5-1.0	2.0-2.5
Chip connection mode	in series	in parallel

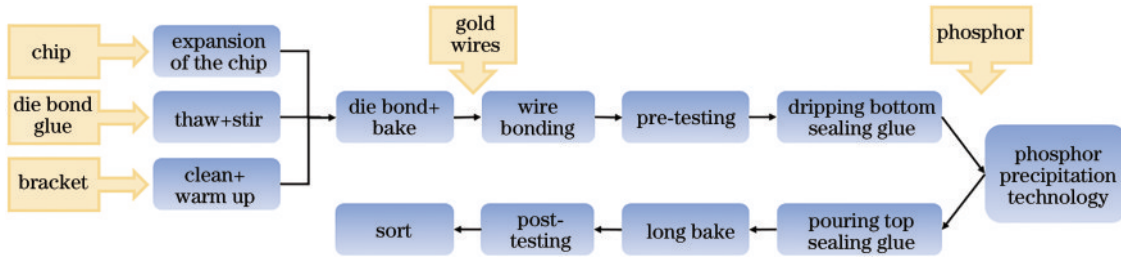


图 9 远程荧光粉 LED 封装流程图

Fig. 9 Flow chart of remote phosphor LED packaging

固定在特制支架上,固晶后进行烘烤,再次进行等离子清洗后使用金线连接支架和晶片,对焊线进行检查,初步测试芯片能否正常发亮。在进行后续步骤前,仍要对支架进行 120 °C 预热 1 h 操作,同时对硅胶(A 剂)和硬化剂(B 剂)进行配胶、搅拌、抽真空并滴入支架作为底胶;然后,通过荧光粉沉淀技术加入一层荧光粉层;最后,灌入封装胶作为顶胶包裹 LED 芯片并通过烘烤固化封装胶,再次测试芯片能否发亮及参数是否合格,选出颜色和电压大致相同的样品。

### 3.3 性能测试

使用超景深三维立体显微镜(VHX-1000E)用于表征远程荧光粉封装后的 LED 形貌。使用 Everfine 远方光学测试系统和光谱分析系统(STC-4000)测定白光 LED 的光色参数。

### 3.4 结果与讨论

在对 LED 芯片支架的优化设计中,从光效的角度,设计了 133.6°/116.9° 的特殊大出光角,利用此结构改变光的反射角,从而出射更多的光;另外,镀银层的厚度从 1  $\mu\text{m}$  左右增加到 2  $\mu\text{m}$  左右,能够更好地保护支架,减少器件对光的吸收,增加反射出光,提高器件的光效。

研究所用的封装胶为高透光率、高折光率的硅胶,与传统使用的硅胶产品折射率为 1.53 相比,研究所用的封装胶折射率为 1.56,减少硅胶对光的吸收,增加器件的光效,且在固化后具有极为优异的气密性,在防水、防硫化、增加器件可靠性、提高产品寿命等方面起着重要作用。同时,研究所用的荧光粉为江苏博睿光电的 BL304M 黄色荧光粉,具体参数如表 3 所示。表 3 中,CIE 为色度坐标图。

通过封装工艺制备了 3 组不同  $h$  的 LED 灯珠,如

表 3 荧光粉参数

Table 3 Parameters of phosphor

Material	Rare earth aluminate
Density / ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	4.8 $\pm$ 0.2
Excitation wavelength /nm	450-455
Domain wavelength /nm	570.4 $\pm$ 0.2
Peak wavelength /nm	553 $\pm$ 1
CIE	$x=0.441\pm 0.002$ ; $y=0.541\pm 0.002$
Peak half-width bandwidth /nm	111.5 $\pm$ 0.5
Color purity /%	94.7 $\pm$ 0.5
Particle size ( $D_{50}$ ) / $\mu\text{m}$	23.5 $\pm$ 1.5

图 10 所示。

其中,图 10(a)和图 10(d)分别为少量底胶 LED 的俯视图和截面图,通过放大部分可知  $h$  为 19  $\mu\text{m}$ ;由图 10(e)、图 10(f)可知,制备的中胶和多胶 LED 的  $h$  分别为 90、107  $\mu\text{m}$ 。对这 3 组不同  $h$  的 LED 灯珠进行光电性能测试,得到的测试结果如表 4 所示。

表 4 中:Tc 为色温;Ra 为显色指数。少胶、中胶、多胶的 LED 灯珠测试光效分别为 221.521、221.968、225.106 lm/W。由光效数据可知,随着  $h$  的增加,光效逐步提高,与仿真结果相符。这主要是因为一定范围内,随着  $h$  的增加,荧光粉激发后反射回芯片的光线数目减少,从而降低光线被芯片吸收的概率,进而提高 LED 的整体光效。

在 3 组实验中,从光效角度而言,效果最好的是  $h$  为 107  $\mu\text{m}$  的远程荧光粉结合双芯片特殊支架封装技术,所得光效为 225.106 lm/W。与传统的单芯片支架封装的灯珠测试所得的光效为 212.003 lm/W (60 mA、2.75 V) 相比较,光效提升了约 6%。

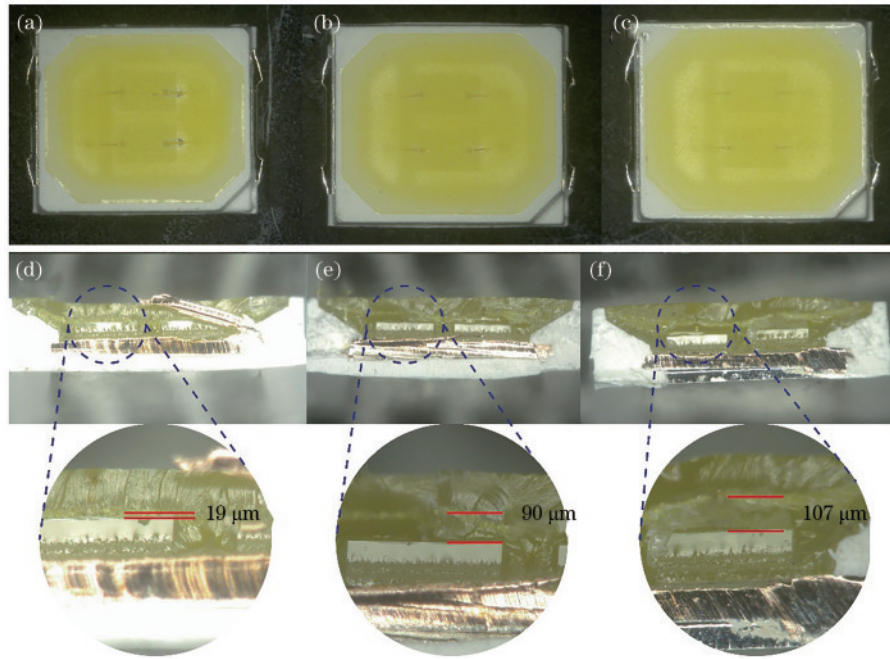


图 10 远程荧光粉 LED 灯珠实物图。(a)~(c)底胶厚度分别为少胶、中胶、多胶的灯珠俯视图；(d)~(f)底胶厚度分别为少胶、中胶、多胶的灯珠截面图

Fig. 10 Physical pictures of remote phosphor LED lamp beads. (a)~(c) Top view of the lamp beads with low, medium and high bottom sealing glue thickness; (d)~(f) cross-sectional view of the lamp beads with low, medium and high bottom sealing glue thickness

表 4 远程封装 LED 灯珠光电性能

Table 4 Optoelectronic performance of remote packaged LED lamp beads

$h / \mu\text{m}$	Current / mA	Voltage / V	Power / mW	Light effect / $(\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$	$T_c / \text{K}$	Domain wavelength / nm	Peak wavelength / nm	Ra
19	59.867	2.7049	161.93	221.521	5067.1	565.14	452.52	71.09
90	59.9	2.7064	162.10	221.968	5115.3	564.12	452.50	71.13
107	59.9	2.6999	161.72	225.106	5042.6	564.94	452.76	70.82

## 4 结 论

本研究通过优化 LED 灯珠的封装结构以及改进封装方式相结合,以提高白光 LED 灯珠的光效,采用双芯片封装以及特别设计的支架结构,并结合优化设计后的远程荧光粉封装技术,使灯珠光效达到了 225.106 lm/W,相比传统封装方式光效提高约 6%。其中,在一定范围内,随着远程荧光粉与芯片的距离增大,光效也会有所提高,Light Tools 的仿真结果也印证了此结论。在白光 LED 领域,该方法具有合理性与巨大的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Cho J, Park J H, Kim J K, et al. White light-emitting diodes: history, progress, and future[J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(2): 1600147.
- [2] Li Y, Wang W L, Huang L G, et al. High-performance vertical GaN-based near-ultraviolet light-emitting diodes on Si substrates[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(42): 11255-11260.
- [3] 刘展宇,王沛沛,金志樑,等.用于 LED 集鱼灯稳定照明的自由曲面透镜设计[J].光学学报,2021,41(5): 0522003.  
Liu Z Y, Wang P P, Jin Z L, et al. Free-form lens design for LED fishing lamp with stable illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0522003.
- [4] Gunel H, JaeHyun L, Hyun K Y, et al. Transparent organic light-emitting diodes: advances, prospects, and challenges[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(14): 2002040.
- [5] Ojha A, Banik S, Melanthota S K, et al. Light emitting diode (LED) based fluorescence microscopy for tuberculosis detection: a review[J]. Lasers in Medical Science, 2020, 35(6): 1431-1437.
- [6] Zheng L, He H M, Song W T. Application of light-emitting diodes and the effect of light quality on horticultural crops: a review[J]. HortScience, 2019, 54(10): 1656-1661.
- [7] 孙阿辉,李耀召,陈果,等.基于深蓝光激基复合物构筑的 OLED 植物照明光源[J].光学学报,2022,42(4): 0423001.  
Sun A H, Li Y Z, Chen G, et al. Organic light-emitting diodes based on deep-blue exciplex for plant growth[J].

- Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0423001.
- [8] 迟楠, 黄星星, 王一光. 基于先进调制的高速可见光通信技术[J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(6): 16-20.  
Chi N, Huang X X, Wang Y G. High-speed visible light communication based on advanced modulation technology [J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(6): 16-20.
- [9] Yeh C H, Liu Y L, Chow C W. Real-time white-light phosphor-LED visible light communication (VLC) with compact size[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26192-26197.
- [10] Luo X B, Hu R, Liu S, et al. Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, 56: 1-32.
- [11] Ferreira R X G, Xie E Y, McKendry J J D, et al. High bandwidth GaN-based micro-LEDs for multi-Gb/s visible light communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(19): 2023-2026.
- [12] Sun Z H, Khurshid A, Sohail M, et al. Encapsulation of dyes in luminescent metal-organic frameworks for white light emitting diodes[J]. Nanomaterials, 2021, 11(10): 2761.
- [13] Das D, Gopikrishna P, Barman D, et al. White light emitting diode based on purely organic fluorescent to modern thermally activated delayed fluorescence (TADF) and perovskite materials[J]. Nano Convergence, 2019, 6(1): 31.
- [14] Usman M, Munsif M, Mushtaq U, et al. Green gap in GaN-based light-emitting diodes: in perspective[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2021, 46(5): 450-467.
- [15] Yang J, Liu Z, Xue B, et al. Highly uniform white light-based visible light communication using red, green, and blue laser diodes[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 8200508.
- [16] Uchida Y, Taguchi T. Lighting theory and luminous characteristics of white light-emitting diodes[J]. Optical Engineering, 2005, 44(12): 124003.
- [17] 周明, 高伟, 温存. 一种 RGB 三原色背光实现广色域的技术[J]. 电子产品世界, 2021, 28(2): 38-40, 80.  
Zhou M, Gao W, Wen C. A technique of implementing wide color gamut based on RGB backlight[J]. Electronic Engineering & Product World, 2021, 28(2): 38-40, 80.
- [18] Hu N C, Wu C C, Chen S F, et al. Implementing dynamic daylight spectra with light-emitting diodes[J]. Applied Optics, 2008, 47(19): 3423-3432.
- [19] Leung V Y F, Lagendijk A, Tukker T W, et al. Interplay between multiple scattering, emission, and absorption of light in the phosphor of a white light-emitting diode[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8190-8204.
- [20] Hu R, Yu S, Zou Y, et al. Near-/ mid-field effect of color mixing for single phosphor-converted light-emitting diode package[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(3): 246-249.
- [21] Park J K, Choi K J, Kim K N, et al. Investigation of strontium silicate yellow phosphors for white light emitting diodes from a combinatorial chemistry[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(3): 031108.
- [22] Kimura N, Sakuma K, Hirafune S, et al. Extrahigh color rendering white light-emitting diode lamps using oxynitride and nitride phosphors excited by blue light-emitting diode[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(5): 051109.
- [23] Lin C C, Liu R S. Advances in phosphors for light-emitting diodes[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2011, 2(11): 1268-1277.
- [24] 吴海彬, 王昌铃. 白光 LED 封装材料对其光衰影响的实验研究[J]. 光学学报, 2005, 25(8): 1091-1094.  
Wu H B, Wang C L. Experimental research on influence of packing materials of white LED on its luminous decay [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(8): 1091-1094.
- [25] Narendran N, Gu Y, Freyssonier J P, et al. Extracting phosphor-scattered photons to improve white LED efficiency[J]. Physica Status Solidi (A)-Applications and Materials, 2005, 202(6): R60-R62.
- [26] Ying S P, Fu H K, Tu H Z. Curved remote phosphor structure for phosphor-converted white LEDs[J]. Applied Optics, 2014, 53(29): H160-H164.
- [27] Tsai C C, Cheng W C, Chang J K, et al. Ultra-high thermal-stable glass phosphor layer for phosphor-converted white light-emitting diodes[J]. Journal of Display Technology, 2013, 9(6): 427-432.
- [28] 肖华, 吕毅军, 徐云鑫, 等. 传统白光 LED 与远程荧光粉白光 LED 的发光性能比较[J]. 发光学报, 2014, 35(1): 66-72.  
Xiao H, Lü Y J, Xu Y X, et al. The difference of luminous performance between traditional phosphor packaging LED and remote phosphor LED[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(1): 66-72.