

大功率 LED 荧光粉胶涂覆流动铺展的实验研究

余兴建 郑怀 李岚 罗小兵

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要 为实现蓝光 LED (Light emitting diode) 芯片向白光 LED 照明的转化, 大功率 LED 封装工艺流程中存在一个关键的环节——荧光粉涂覆, 即通过点涂方式将荧光粉硅胶涂覆于 LED 芯片周围。荧光粉硅胶涂覆工艺是一个两相流动过程, 它直接决定了荧光粉硅胶层的几何形貌及物理特性, 并影响 LED 最终的光学和热学性能; 因此对其中流动过程物理机制的理解有利于提升荧光粉涂覆质量, 实现高性能 LED 产品。基于以高速摄像机为核心的光学实验平台, 对荧光粉硅胶在平坦基板表面涂覆流动铺展过程的形貌进行了捕捉, 并研究了涂覆高度、荧光粉浓度和基板表面温度对流动过程的影响。实验结果表明, 依据相对铺展速度的变化特性可以将荧光粉涂覆流动过程分为撞击阶段、铺展阶段和稳定成形阶段; 涂覆高度、荧光粉浓度、基板表面温度的改变会对流动铺展不同阶段的接触线长度和相对铺展速度 $dL/(D \cdot dt)$ 造成影响, 基板温度的改变还会影响到最终接触线长度。

关键词 荧光粉涂覆; 流动铺展; 接触线; 相对铺展速度

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2015)05-1096-05

Experimental Study on the Wetting and Spreading Behaviors of LED Phosphor Coating Process

YU Xing-Jian ZHENG Huai LI Lan LUO Xiao-Bing

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract For the realization of the transformation from blue Light LED chip to the white LED lighting, phosphor silicone coating process is an important process. This process is a typical two phase flow, which directly determines the geometry and physical properties of the phosphor layer, and affects the optical and thermal properties of LED. Therefore it is important to understand the wetting and spreading behaviors in the coating process for improving the phosphor coating quality as well as the LED performance. An experiment platform based on high speed camera was applied to capture the morphology of phosphor gel during wetting and spreading process, coating height, phosphor concentration and substrate temperature were studied through experiments respectively. Results show that the phosphor spreading process can be divided into three stages, collision stage, speeding stage, stable forming stage, respectively. According to the spreading velocity difference, dynamic contact line and relative spreading velocity $dL/(D \cdot dt)$ change with coating height, phosphor concentration and substrate temperature. Besides, substrate temperature also affects the final contact line length.

Key words phosphor coating; wetting and spreading; contact line; relative spreading velocity

0 前 言

大功率 LED 由于其具有效率高、寿命长、体积小、环保节能等优点, 已经在通用照明和特种照明领域得到了广泛的应用, 如景观照明、路灯、隧道灯、汽车照明、各种尺寸背光源 (液晶电视, 液晶显示器, 手机屏) 等^[1-3]。在 LED 应用中白光 LED 的应用最为广泛。目前获取白光 LED 主要有两种途径, 一种由单芯片与荧光粉组成, 另一种由多芯片组成, 其

中前者由于工艺简单、成本较低, 被广泛应用于白光 LED 生产。

荧光粉转化白光^[4]LED 工艺中一个重要的环节——荧光粉涂覆工艺, 荧光粉硅胶流体从点涂机器中流出在表面张力等作用下在芯片表面铺开, 经过固化过程, 最终形成荧光粉硅胶层。荧光粉胶涂覆成形过程本质上是一个两相流动过程, 荧光粉层最

收稿日期: 2015-02-14; 修订日期: 2015-04-17

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51376070)

作者简介: 余兴建 (1990-), 男, 硕士, 主要从事 LED 工艺流动研究。通信作者: 罗小兵, 教授, Email: Luoxb@hust.edu.cn.

终的几何形貌由这一过程决定, 而荧光粉层形貌又决定了 LED 的最终光学性能。

目前, LED 封装制造中常常遇到由于不理想荧光粉涂覆导致的低光学性能的 LED 产品, 增加了 LED 产品的制造成本。研究表明导致上述问题的主要来源于荧光粉涂覆工艺过程中荧光粉层几何形貌不理想^[5-6]。为了实现理想的荧光粉层几何形貌, 国内外研究者开发了复杂的荧光粉涂覆工艺, 如美国 Philips Lumileds 开发的电泳法^[7]和 Lumiraminc 方法^[8]; 美国 CREE 公司发明的溶液蒸发法^[5]; 德国 OSRAM 公司发明的圆片级封装^[6]; 以及目前台湾地区大型 LED 封装企业提出的脉冲喷涂的工艺方法^[9]。然而这些工艺往往带来高的制造成本和难度, 因此这些高技术要求的涂覆工艺并不是一种最理想的解决途径。

要实现低成本、高光学性能的荧光粉层几何形貌的控制, 就必须对荧光粉涂覆成形工艺过程有清晰的认识, 要对荧光粉涂覆过程中流动铺展过程深入理解。然而目前对 LED 荧光粉涂覆过程中流动铺展过程缺乏深入了解, 开发工艺过程缺少理论依据和技术指导。

因此本文基于以高速摄像机为核心的实验平台, 捕捉荧光粉硅胶在流动铺展过程的形貌, 研究了涂覆高度、荧光粉浓度和基板表面温度对流动铺展过程的影响。

1 实验平台介绍

为了捕捉到荧光粉硅胶流动铺展中的形貌变化, 搭建了以高速摄像机为核心的光学实验平台。如图 1 所示, 实验平台主要由高速摄像机、注射泵、多方向微动平台、稳压稳流电源、LED 光源、高速摄像

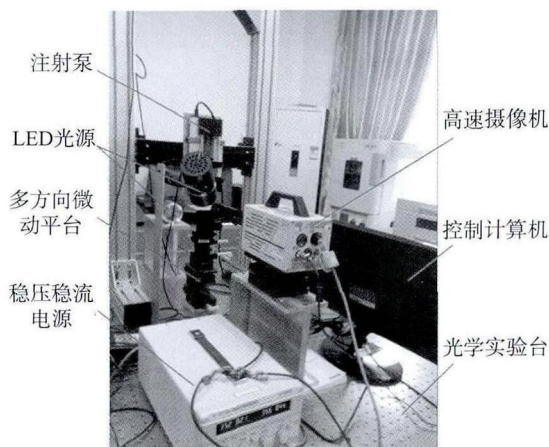


图 1 实验平台

Fig. 1 Experiment platform

机控制计算机等组成。使用高速摄像机及控制计算机可以捕捉到荧光粉硅胶流动铺展的形貌变化, 使用注射泵可以准确控制荧光粉硅胶液滴的体积, 使用稳压稳流电源可以控制 LED 光源的输入电压和电流从而改变光源的亮度, 使用多方向微动平台可以确定涂覆的位置精度。

2 结果与讨论

2.1 荧光粉硅胶流动铺展过程

荧光粉硅胶涂覆流动铺展过程的实质上液滴在固体表面的润湿过程, 当荧光粉硅胶涂覆在基板上, 在表面张力作用和惯性力的作用下, 荧光粉硅胶形貌会发生一系列的变化。

图 2 为基板温度为 60°C 时的荧光粉硅胶铺展过程。图 3 为基板温度为 60°C 时接触线随时间的变化曲线, 其横坐标为时间, 纵坐标为硅胶和基板的接触线长度。

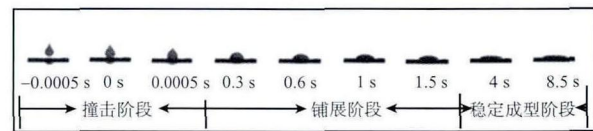


图 2 基板温度为 60°C 时的荧光粉硅胶铺展过程

Fig. 2 Time resolved images of the spreading process of a silicone droplet at substrate temperature of 60°C

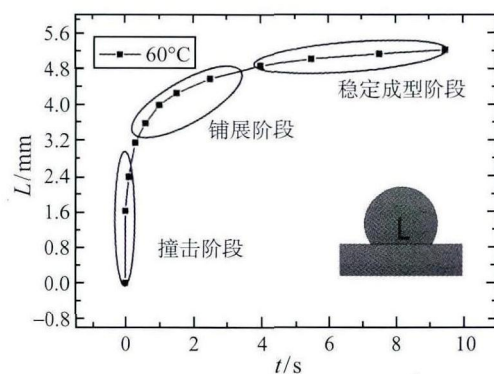


图 3 基板温度为 60°C 时接触线随时间的变化曲线

Fig. 3 Time evolution of the dynamic contact radius at substrate temperature of 60°C

为了定性描述流动铺展过程的快慢, 定义荧光粉硅胶相对铺展速度为接触线与初始直径之比与时间的比值, 如公式 (1) 所示

$$V = \frac{dL}{D \cdot dt} \quad (1)$$

式中, L 和 D 分别表示荧光粉硅胶和基板的接触线

长度和荧光粉硅胶的初始球状直径, 实验中将 D 控制为 2 mm。

图 4 为基板温度为 60°C 时接触线随时间的变化曲线, 其横坐标为时间, 纵坐标为相对铺展速度。由于撞击阶段的铺展速率接近无穷大, 因此横坐标的起点是 0.05 s。

由图 2 和图 3 分析可知, 根据接触线随时间的变化特性可以将流动铺展过程分为三个阶段: 撞击阶段、铺展阶段和稳定成形阶段。

荧光粉硅胶液滴从点涂设备中流出后, 首先与基板发生碰撞, 在惯性力和表面张力的作用下, 其上部仍然保持球状, 只有下部与基板表面接触, 这一阶段发生在荧光粉硅胶与铝基板接触后很短的时间内, 称为撞击阶段, 持续时间约为 0.0005 s; 随着时间的推移, 在最小表面自由能的驱动下, 荧光粉硅胶流体在铝基板表面逐渐铺开, 与基板之间的接触面积不断增加, 这一过程为铺展阶段, 持续时间约为 3 s; 随后, 荧光粉硅胶的形貌变化逐渐停止, 最终在基板上形成稳定的球帽状荧光粉硅胶层, 这一过程为稳定成形阶段, 稳定成形阶段持续的时间约为 6 min。

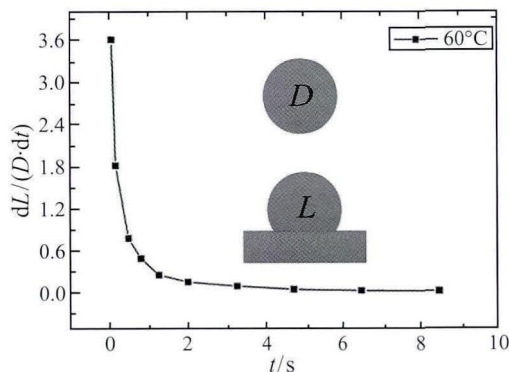


图 4 基板温度为 60°C 时铺展速度随时间的变化曲线
Fig. 4 Time evolution of the spreading velocity at substrate temperature of 60°C

2.2 涂覆高度对荧光粉胶涂覆过程的影响

基于以高速摄像机为核心的实验平台研究了涂覆高度对流动铺展的影响。控制基板表面温度 20°C , 采用铝材料基板, 取荧光粉与硅胶质量比为 0.1:1 (即荧光粉浓度), 控制荧光粉硅胶液滴初始直径大小 2 mm, 调整涂覆高度为 90 mm 和 130 mm。

图 5 为涂覆高度为 90 mm 和 130 mm 时接触线长度随时间的变化曲线; 图 6 为涂覆高度为 90 mm 和 130 mm 时铺展速度随时间的变化曲线。

由图 5 分析可知, 涂覆高度增加使撞击阶段更

加剧烈, 涂覆高度为 90 mm 和 130 mm, 撞击阶段结束时接触线长度分别为 1.72 mm 和 1.99 mm; 由图 6 分析可知, 涂覆高度增加使铺展阶段前期的速率增加, 涂覆高度为 90 mm 和 130 mm, 在 0.05 s 时铺展速度分别 0.93 s^{-1} 和 1.35 s^{-1} 。这是由于涂覆高度的增加会使得荧光粉硅胶液滴初始势能增加导致的。

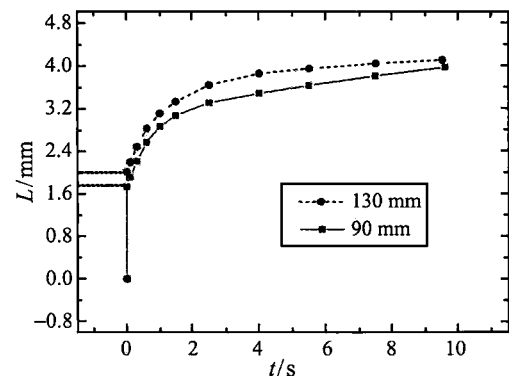


图 5 涂覆高度为 90 mm 和 130 mm 时接触线长度随时间的变化曲线

Fig. 5 Time evolution of the dynamic contact radius at coating height of 90 mm and 130 mm

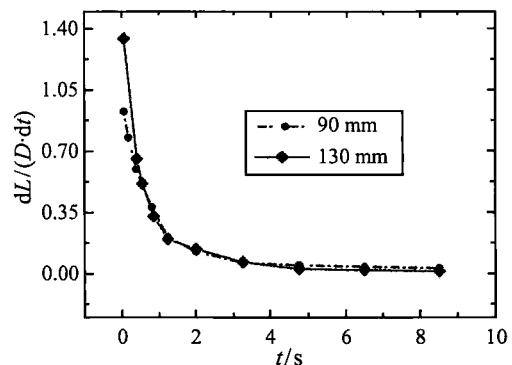


图 6 涂覆高度为 90 mm 和 130 mm 时铺展速度随时间的变化曲线

Fig. 6 Time evolution of the spreading velocity at coating height of 90 mm and 130 mm

2.3 荧光粉浓度实验

基于以高速摄像机为核心的实验平台研究了荧光粉浓度对流动铺展的影响。控制基板表面温度为 20°C , 采用铝材料基板, 调整涂覆高度为 110 mm, 控制硅胶液滴初始球状直径大小 2 mm, 取荧光粉浓度为 0.05:1, 0.25:1。

图 7 所示为荧光粉浓度为 0.05:1 和 0.25:1 时接触线长度随时间的变化曲线; 图 8 所示的为荧光粉浓度为 0.05:1 和 0.25:1 时铺展速度随时间的变化

曲线。

由图 7 分析可知, 荧光粉硅胶浓度对撞击阶段基本无影响 (接触线也会改变); 由图 8 分析可知, 荧光粉浓度的增加会使铺展阶段的铺展速度减小, 荧光粉浓度为 0.05:1 和 0.25:1 时, 0.05 s 的铺展速度分别 1.35 s^{-1} 和 1.14 s^{-1} 。这是由于荧光粉浓度的增加会导致荧光粉硅胶的黏度增大, 从而增大了铺展阶段的流动阻力。

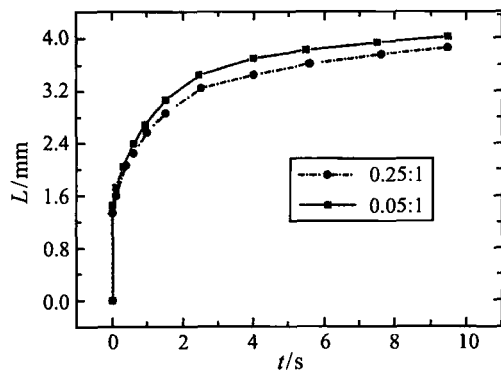


图 7 荧光粉硅胶浓度为 0.05:1 和 0.25:1 时接触线长度随时间的变化曲线

Fig. 7 Time evolution of the dynamic contact line at phosphor concentration of 0.05:1 and 0.25:1

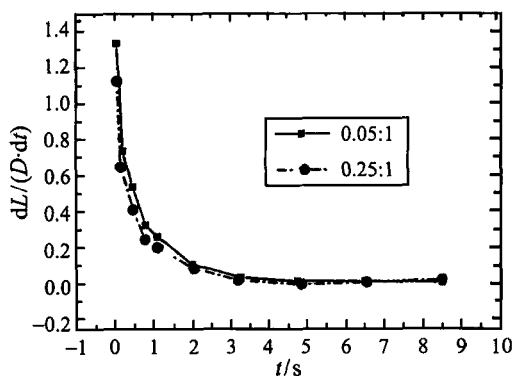


图 8 0.05:1 和 0.25:1 时铺展速度随时间的变化曲线

Fig. 8 Time evolution of the spreading velocity at phosphor concentration of 0.05:1 and 0.25:1

2.4 基板表面温度实验

基于以高速摄像机为核心的实验平台研究了荧光粉浓度对流动铺展的影响。调整涂覆高度为 110 mm, 采用铝材料基板, 取荧光粉浓度为 0.1:1, 控制硅胶液滴初始球状直径大小 2 mm, 控制基板表面温度为 20°C 、 60°C 、 100°C 。

图 9 为基板表面温度为 20°C 、 60°C 和 100°C 时接触线长度随时间的变化。

图 10 为基板表面温度为 20°C 、 60°C 和 100°C 时铺展速度随时间的变化。

图 11 所示为基板表面温度为 20°C 、 60°C 和 100°C 时的最终接触线长度。

由图 9 分析可知, 基板表面温度增加对撞击阶段基本没有影响; 由图 10 分析可知, 基板表面温度增加使铺展阶段的铺展速度增加, 基板表面温度为 20°C 、 60°C 和 100°C 时, 0.05 s 的相对铺展速度分别为 1.39 s^{-1} 、 3.59 s^{-1} 、 4.58 s^{-1} ; 由图 11 分析可知, 基板表面温度增加会影响基板的最终接触线长度, 基板表面温度为 20°C 、 60°C 和 100°C , 最终接触线长度分别为 4.30 mm、7.16 mm 和 4.78 mm。这是由于基板表面温度增加, 硅胶液滴和基板表面接触后被加热导致硅胶黏度减小, 铺展阶段流动阻力变小, 但是当温度达到 100°C 时, 硅胶液滴发生固化, 导致硅胶黏度增大, 增加了硅胶的流动阻力。

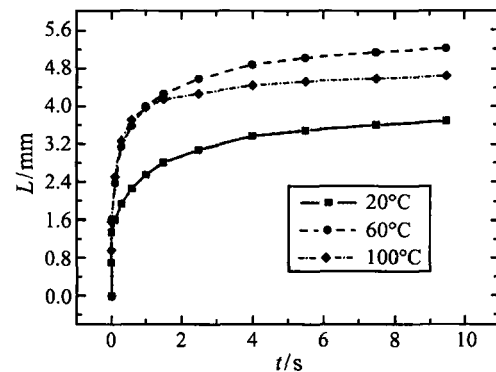


图 9 基板温度为 20°C 、 60°C 和 100°C 时接触线长度随时间的变化曲线

Fig. 9 Time evolution of the dynamic contact line at substrate temperature of 20°C , 60°C and 100°C

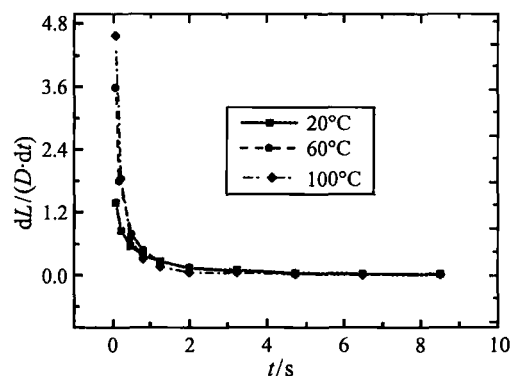


图 10 基板温度为 20°C 、 60°C 和 100°C 时铺展速度随时间的变化曲线

Fig. 10 Time evolution of the spreading velocity at substrate temperature of 20°C , 60°C and 100°C

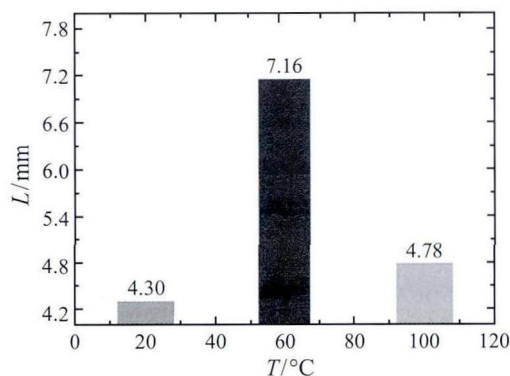


图 11 基板温度为 20°C、60°C 和 100°C 时最终接触线长度
Fig. 11 Final contact line at substrate temperature of 20°C, 60°C and 100°C

3 结 论

基于以高速摄像机为核心的实验平台对荧光粉硅胶在流动铺展过程中的形貌进行了捕捉,并研究了涂覆高度、荧光粉浓度和基板表面温度对荧光粉硅胶流动铺展的影响。实验结果表明,流动铺展过程可以分为撞击阶段、铺展阶段和稳定成形阶段,其中撞击阶段持续时间约 0.0005 s,铺展阶段持续时间约为 3 s,稳定成形阶段的时间较长,但是铺展速率 $dL/(D \cdot dt)$ 小于 0.05 s^{-1} ,因此对流动的影响很小。涂覆高度增大使撞击阶段更加剧烈,并且使铺展阶段的铺展速度增大,涂覆高度为 90 mm 和 130 mm,撞击阶段结束时接触线长度分别为 1.72 mm 和 1.99 mm,在 0.05 s 时相对铺展速度分别 0.93 s^{-1} 和 1.35 s^{-1} 。荧光粉浓度增大使铺展阶段的铺展速度减小,荧光粉浓度为 0.05:1 和 0.25:1,在 0.05 s 时相对铺展速度分别 1.35 s^{-1} 和 1.14 s^{-1} 。基板表面温度增加使铺展阶段速率增大,但是温度高于一定时,硅胶迅速固化导致最终接触线长度减小,基板表面温度为

20°C、60°C 和 100°C,在 0.05 s 时相对铺展速度分别为 1.39 s^{-1} 、 3.59 s^{-1} 、 4.58 s^{-1} ,最终接触线长度分别为 4.30 mm、7.16 mm 和 4.78 mm。

参 考 文 献

- [1] LIU Sheng and LUO Xiaobing. LED Packaging for Lighting Applications: Design, Manufacturing and Testing [M]. USA: John Wiley & Sons, 2011
- [2] Zukauskas A, Shur M S, and Caska R. Introduction to Solid-State Lighting [M]. USA: John Wiley & Sons, 2002
- [3] HU Run, LUO Xiaobing, FENG Han, et al. Effect of Phosphor Settling on the Optical Performance of Phosphor Converted LED [J]. Journal of Luminescence, 2012, 132(5): 1252-1256
- [4] WU Bulong, LUO Xiaobing, ZHENG Huai, et al. Effect of Gold Wire Bonding Process on Angular Correlated Color Temperature Uniformity of White Light-Emitting Diode [J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24115-24121
- [5] Collins W D, Krames M R, Verhoeckx G J, et al. Using Electrophoresis to Produce a Conformal Coated Phosphor-Converted Light Emitting Semiconductor: US Patent, 6576488 [P]. June 11, 2001
- [6] Bechtel H, Schmidt P, Busselt W et al. Lumiraminc(TM): A New Phosphor Technology for High Performance Solid State Light Sources [C]// 8th International Conference on Solid State Lighting. San Diego, CA, 2008: 70580E
- [7] ZHENG Huai, MA Jinlong, LUO Xiaobing, et al. Precise Model of Phosphor Geometry Formed in Dispensing Process of LED Packaging [C]// 12th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging. Shanghai, China, 2011: 1077
- [8] ZHENG Huai, MA Jinglong and LUO Xiaobing. Conformal Phosphor Distribution for White Lighting Emitting Diode Packaging by Conventional Dispensing Coating Method with Structure Control [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2013, 3(3): 417-421
- [9] Loh B P, JR N W M, Andrews P, et al. Method of Uniform Phosphor Chip Coating and LED Package Fabricated Using Method: US Patent, 2008079017A1 [P]. 2008