

基于光学相干层析技术的白光 LED 荧光粉沉淀检测

肖文浩¹, 陈庆堂^{1,2*}, 林正英¹¹福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108;²莆田学院机电与信息工程学院, 福建 莆田 351100

摘要 荧光粉沉淀是影响白光 LED 发光质量和光学一致性的关键因素。为了实现荧光粉沉淀的快速、无损检测, 提出一种基于光学相干层析(OCT)技术的荧光粉沉淀检测方法。使用 OCT 系统对白光 LED 进行成像, 比较白光 LED 的 OCT 与切片图像, 分析了荧光粉的数量分布和沉淀物形态。根据荧光粉数量与面积分数的关系以及荧光粉沉淀过程中荧光粉数量分布的变化特点, 设计了从 OCT 图像中提取荧光粉面积分数的算法, 分析了荧光粉面积分数与荧光粉沉淀程度的变化关系。实验结果表明, OCT 技术可以准确检测白光 LED 的荧光粉沉淀物形态, 荧光粉在 OCT 图像中的面积分数可以量化荧光粉沉淀程度。该方法可以满足白光 LED 荧光粉沉淀的检测要求, 并可用于白光 LED 的质量检测和封装工艺研究。

关键词 光学相干层析; 白光 LED; 荧光粉沉淀; 无损检测; 量化分析

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230594

Detection of Phosphor Sedimentation in White LEDs Based on Optical Coherence Tomography

Xiao Wenhao¹, Chen Qingtang^{1,2*}, Lin Zhengying¹¹School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;²School of Mechanical, Electrical and Information Engineering, Putian University, Putian 351100, Fujian, China

Abstract Phosphor sedimentation is a key factor affecting the light quality and optical consistency of white light-emitting diodes (LEDs). Herein, a detection method based on optical coherence tomography (OCT) is proposed to realize rapid, nondestructive detection of phosphor sedimentation in white LEDs. For this purpose, a white LED was imaged by an OCT system. Subsequently, the OCT and section images of the LED were compared, and the quantity distribution and sediment morphology of phosphor were analyzed. In addition, an algorithm was developed to extract the area fraction of phosphor from the OCT images based on the relationship between the quantity and area fraction of phosphor and the variations in quantity distribution during sedimentation. Furthermore, the relationship between the area fraction of phosphor and the degree of phosphor sedimentation was studied. The experimental results show that OCT can accurately determine the phosphor sediment morphology in white LEDs and that the area fraction of phosphor observed in the OCT images can quantify the degree of phosphor sedimentation. This method can meet the detection requirements of phosphor sedimentation in white LEDs and can be used for their quality testing and packaging process research.

Key words optical coherence tomography; white LED; phosphor sedimentation; nondestructive detection; quantitative analysis

1 引言

白光 LED 自 20 世纪 90 年代被发明以来, 因其节能高效、可靠性高、使用寿命长等优点, 成为当今绿色

照明的主要选择^[1]。当前白光 LED 主要通过蓝光 LED 芯片和黄色荧光粉的组合实现白光, 其原理为蓝光 LED 芯片发出蓝光, 黄色荧光粉吸收部分蓝光并发出黄光, 未被吸收的蓝光与黄光混合并发出白光^[1]。

收稿日期: 2023-02-08; 修回日期: 2023-03-14; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

基金项目: 福建省科技指导性项目(2021H0059)、福建省自然科学基金项目(2022J05256)、莆田学院研究生创新基金资助项目(2021093)、福建省数控机床与智能制造重点实验室项目(KJTPT2019ZDSY02020063)

通信作者: *chenqingt@126.com

荧光粉是通过在 LED 芯片上方涂覆荧光胶并加热固化实现固定的,而荧光胶是荧光粉和硅树脂按一定比例均匀混合制成的材料^[2]。

由于荧光粉的密度大于硅树脂,在荧光胶固化前,重力的作用会使荧光粉在硅树脂中沉淀,这会导致荧光粉在硅树脂中分布不均,并呈现为深度方向的阶梯分布^[3-5]。在白光 LED 涂覆荧光胶后等待送烤的静置期间,荧光粉沉淀会使白光 LED 所发白光的色温与亮度分布不均,降低白光 LED 的发光质量^[6-7]。对此,用于白光 LED 的离心工艺被提出^[8-9],其通过离心处理涂覆了荧光胶的白光 LED,使荧光粉在短时间内迅速沉淀,确保所有白光 LED 拥有一致的荧光粉分布,从相反途径消除了荧光粉沉淀的不利影响。对于白光 LED 的产品质量检测 and 封装工艺研究而言,荧光粉沉淀检测是必要的,这不仅可以排除荧光粉沉淀导致的不合格产品以提升产品质量,也可为离心工艺的参数选择和质量评估提供参考依据。

当前白光 LED 的荧光粉沉淀检测方法较少,主要为金相切片法^[5]。金相切片法能够准确检测某一时刻的荧光粉沉淀,但其具有有损、效率低、无法检测整个荧光粉沉淀过程的缺点。理想的荧光粉沉淀检测方法不仅需要满足无损、非接触、快速、准确的要求,还需要能够与计算机算法相结合,实现荧光粉沉淀的自动化检测。20 世纪 90 年代初诞生的光学相干层析(OCT)技术是一种无损、非接触、微米级分辨率断面成像技术^[10-11],其诞生之初就被应用于视网膜和冠状动脉检查^[12],随着 OCT 技术的发展,其在工业领域的应用范围不断拓展,并已应用于 3D 打印件无损检测^[13]和振动测量^[14],在 LED 方面也应用于结温^[15]和热膨胀系数^[16]的测量。

为了实现白光 LED 荧光粉沉淀的快速、无损检测,本文基于谱域 OCT 系统(SD-OCT)开展检测方法研究,使用 OCT 系统扫描获取白光 LED 的 OCT 图像,通过比较 OCT 与切片图像分析 OCT 技术检测荧光粉的数量分布与沉淀物形态的效果,根据荧光粉在 OCT 图像中的面积分数量化荧光粉沉淀程度。该方法实现了荧光粉沉淀物的准确检测和荧光粉沉淀程度的量化评估,可以用于白光 LED 的产品质量检测 and 封装工艺研究。

2 原 理

研究所用 OCT 系统为 Thorlabs 公司生产的 GAN930V2-BU 型 SD-OCT 系统,结构如图 1 所示,其光源中心波长为 930 nm,轴向分辨率为 6 μm (空气中),横向分辨率为 8 μm ,最大探测深度为 2.9 mm(空气中),A 扫描速度为 36 kHz,探测灵敏度为 93 dB。白光 LED 的荧光胶是一种半透明、亚毫米级厚度的薄层材料,荧光粉的粒径一般为 5~20 μm ,可使用 OCT 系统观察荧光胶内的荧光粉,检测荧光粉的数量分布和

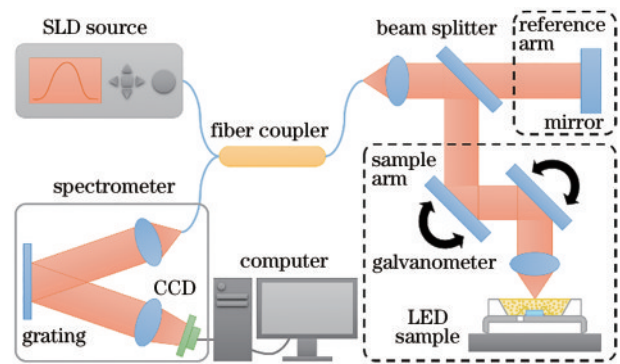


图 1 SD-OCT 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SD-OCT system

沉淀物形态。

使用 OCT 系统对荧光粉分布均匀的 5730 SMD 白光 LED 连续进行 10 次 B 扫描。其中,每次 B 扫描由 1754 次 A 扫描组成,扫描区域为长 5 mm 的白光 LED 中轴线,如图 2(a)中虚线所示。可在 0.6 s 内获取由 10 张 OCT 图像平均降噪后的 OCT 图像,如图 2(b)所示,OCT 图像的大小为 1754 pixel \times 1024 pixel,像素值为干涉信号强度,像素尺寸为 2.85 μm 。OCT 图像中可以观察到白光 LED 的支架、LED 芯片、导线以及荧光粉和硅树脂组成的荧光胶。由于荧光粉在荧光胶断面一定范围内的数量变化与荧光粉沉淀是同步进行的,并且一定范围内的荧光粉数量可以由荧光粉的面积分数表示。为实现白光 LED 荧光粉沉淀程度的量化和自动检测,设计了从 OCT 图像中自动提取荧光粉面积分数的算法,算法流程如图 3 所示,具体步骤如下:

1) 读取 OCT 系统扫描白光 LED 后平均降噪的 OCT 图像。

2) 提取中心一维信号。从如图 2(b)中竖直虚线所示的 OCT 图像中心提取如图 2(c)所示的中心一维信号。

3) 获取荧光胶表面深度。由于荧光胶表面平整光滑,在空气中具有最大干涉强度,在中心一维信号中搜索最大值点,获取荧光胶表面的深度,以便在不同白光 LED 的 OCT 图像中划取统一的荧光粉面积分数提取区域。

4) 划取荧光粉面积分数提取区域。结合 OCT 图像中邻近荧光胶表面的荧光粉能见度较高的特点,同时为避免荧光胶表面和导线对荧光粉面积分数提取的干扰,划取距荧光胶表面 15 pixel 并处于图像水平中央的矩形区域作为荧光粉面积分数提取区域,如图 2(b)中的虚线框所示,其大小为 1255 pixel \times 80 pixel。

5) 阈值分割荧光粉面积分数提取区域。为去除硅树脂干扰,以纯硅树脂干涉信号强度的最大值为分割阈值对荧光粉面积分数提取区域进行分割,以获取如图 2(e)中虚线框所示的二值图像,二值图像中白色部

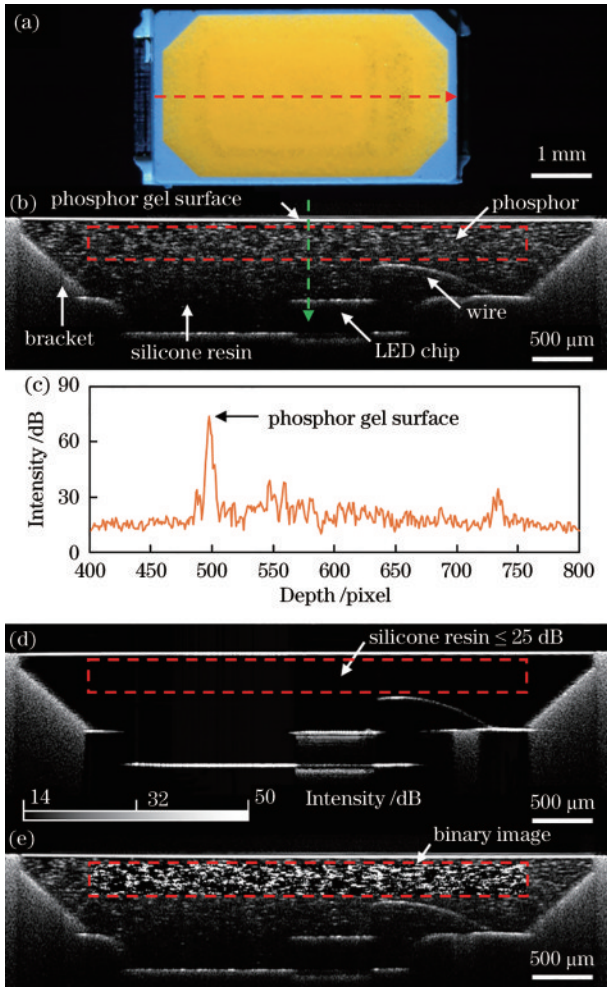


图 2 荧光粉面积分数提取原理。(a)扫描区域;(b)白光LED OCT 图像;(c)中心一维信号;(d)非白光LED OCT 图像;(e)提取区域二值图像

Fig. 2 Extraction principle of phosphor area fraction. (a) Scan area; (b) white LED OCT image; (c) central 1D signal; (d) non-white LED OCT image; (e) binary image of extraction area

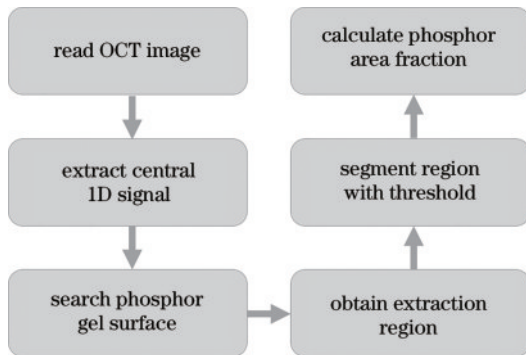


图 3 荧光粉面积分数提取流程

Fig. 3 Extraction process of phosphor area fraction

分为荧光粉。分析实验所用硅树脂涂覆的非白光LED OCT 图像后,可知提取区域内硅树脂的干涉信号强度不超过 25 dB[图 2(d)],故以 25 为分割阈值。

6) 计算荧光粉面积分数。通过提取区域的二值图

像计算荧光粉面积分数,荧光粉面积分数为

$$A = \frac{P_1}{P_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:A 为荧光粉面积分数; P_1 为提取区域二值图像中像素值为 1(白色像素)的像素数; P_2 为提取区域二值图像的像素总数。

3 实验

在室温 24 °C 的环境中,按 1:5 的质量比混合平均粒径为 15 μm 的 YAG 黄色荧光粉和折射率为 1.54 的硅树脂,对混合物进行充分搅拌和真空脱泡处理,配制荧光粉质量分数为 16.67% 的荧光胶。期间,将 15 个完成固晶和焊线的 5730 SMD 白光 LED 半成品送入烤箱,100 °C 加热 1 h,使白光 LED 半成品完全干燥,然后水平放置,等待涂覆荧光胶。将配制好的荧光胶装入点胶机针筒,使用点胶机将荧光胶平整均匀地涂覆在每个白光 LED 半成品的芯片上方。

取出其中 1 个涂覆了荧光胶的白光 LED 作为荧光粉沉淀前的白光 LED,立即使用 OCT 系统对其进行 B 扫描,获取 OCT 图像后迅速将其送入烤箱,先 100 °C 加热 1 h,后 150 °C 加热 3 h,使荧光胶完全固化,确保白光 LED 内的荧光粉分布均匀。加热结束后,取出白光 LED 并将其放入环氧树脂中静置 24 h,环氧树脂完全固化后,使用金相磨机对其打磨抛光,制成金相切片,并使用显微镜拍摄白光 LED 在 OCT 扫描区域的切片图像。

将其余 14 个白光 LED 水平静置 3 h,使荧光粉逐渐沉淀。分别在静置 0、10、20、30、40、50、60、75、90、105、120、150、180 min 时,使用 OCT 系统对每个白光 LED 进行 B 扫描,获取 OCT 图像,并分析不同静置时间 OCT 图像中荧光粉的数量分布与沉淀物形态。然后使用算法从 OCT 图像中提取不同静置时间的荧光粉面积分数,绘制荧光粉面积分数与静置时间的变化曲线,分析荧光粉面积分数与荧光粉沉淀程度的变化关系。

将 14 个白光 LED 继续水平静置,直至静置时间达到 24 h,确保荧光粉完全沉淀。静置结束后,使用 OCT 系统对每个白光 LED 进行 B 扫描,获取 OCT 图像。随后按相同步骤将 14 个白光 LED 制作为金相切片并拍摄切片图像。比较荧光粉沉淀前后白光 LED 的 OCT 与切片图像,分析 OCT 图像中荧光粉的数量分布,然后根据 OCT 与切片图像测量 LED 芯片上方 500 μm 水平范围内的荧光粉沉淀物厚度,分析 OCT 图像中荧光粉沉淀物的厚度测量误差。

4 结果与讨论

白光 LED 在荧光粉沉淀前后的图像如图 4 所示,其中,OCT 图像按荧光胶的平均折射率 1.5462 进行纵向缩放,以符合实际纵向尺寸。比较荧光粉沉淀前

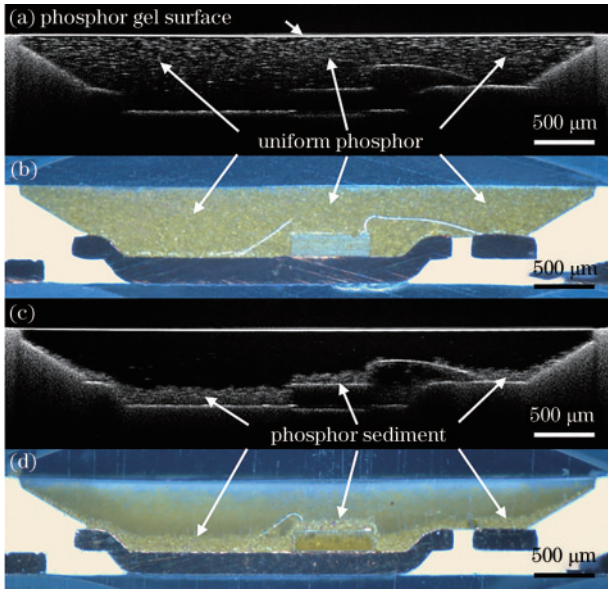


图 4 荧光粉沉淀前后的白光 LED 图像。(a)(b)沉淀前的 OCT 与切片图像;(c)(d)沉淀后的 OCT 与切片图像
Fig. 4 Images of white LED before and after phosphor sedimentation. (a) (b) OCT and slice image before sedimentation; (c) (d) OCT and slice image after sedimentation

的图像可知,此时荧光粉分布均匀,尽管无法从 OCT 图像中观察到荧光胶最深处的荧光粉,但邻近荧光胶表面的荧光粉在数量分布上与切片图像相似;比较荧光粉沉淀后的图像可以看出,OCT 与切片图像中邻近荧光胶表面的荧光粉均完全消失,这些荧光粉已沉淀至支架反射杯和 LED 芯片的表面,并形成了荧光粉沉淀物。除因导线遮挡而无法观察到导线下方的荧光粉沉淀物外,OCT 图像中的荧光粉沉淀物形态与切片图像相似。以上分析结果初步表明,OCT 图像可以反映白光 LED 内的荧光粉数量分布以及支架反射杯和 LED 芯片表面的荧光粉沉淀物形态。

LED 芯片表面的荧光粉沉淀物包含绝大部分负责转换蓝光的荧光粉,该部分沉淀物是否平整均匀对于离心工艺封装的白光 LED 至关重要。分别从同一白光 LED 的 OCT 与切片图像中手动选取如图 5(a)、(b)所示的荧光粉沉淀物轮廓,测得不同水平位置的厚度以及二者间的误差,具体如图 5(c)所示。其中,OCT 图像的纵向像素尺寸为 $1.84 \mu\text{m}$,切片图像为 $0.64 \mu\text{m}$,最大绝对误差为 $4.88 \mu\text{m}$,平均绝对误差为 $1.46 \mu\text{m}$,考虑到手动选取轮廓带来的误差,可以认为 OCT 与切片图像间的测量误差是较小的。在测量 14 个白光 LED 后,最大绝对误差和平均绝对误差如图 5(d)所示。其中,最大绝对误差均小于 $5 \mu\text{m}$,平均绝对误差均小于 $2 \mu\text{m}$,这表明 OCT 与切片图像中的荧光粉沉淀物形态高度相似,OCT 图像可以准确反映荧光粉沉淀物的形态,由于荧光粉沉淀物表现为一种特殊的荧光粉数量分布,这也进一步表明 OCT 图像可

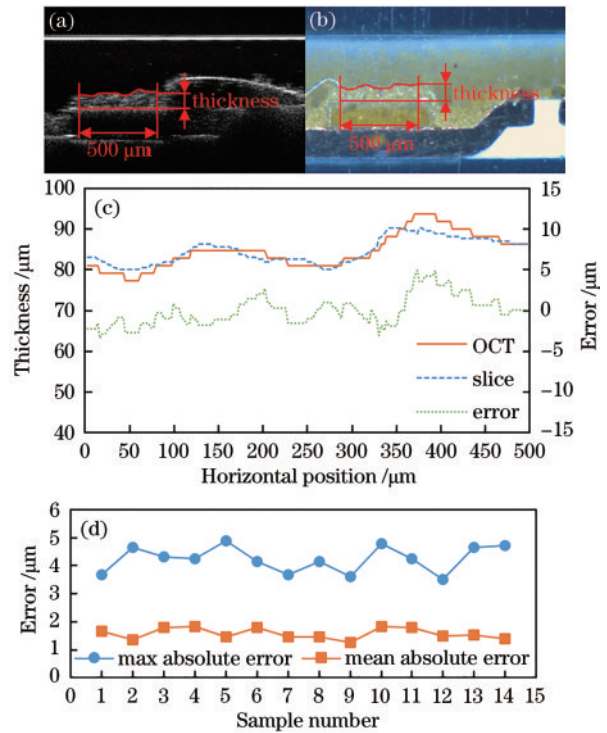


图 5 荧光粉沉淀物厚度测量结果。(a)(b)OCT 与切片图像中的荧光粉沉淀物轮廓;(c)厚度与误差;(d)最大绝对误差与平均绝对误差
Fig. 5 Measurement results of phosphor sediment thickness. (a) (b) Outlines of phosphor sediment in OCT and slice images; (c) thickness distribution and error; (d) maximum absolute error and mean absolute error

以反映荧光粉的数量分布。在离心工艺研究中可以通过白光 LED 的 OCT 图像分析荧光粉沉淀物的平整均匀程度,从而确定合适的离心机控制参数和评估离心工艺质量。

同一白光 LED 不同静置时间的 OCT 图像如图 6 所示。从 OCT 图像中可以观察到,白光 LED 静置期间,荧光粉面积分数提取区域内的荧光粉持续减少,荧光粉持续沉淀且速度前后不一。静置 0 min 时,提取区域内具有大量荧光粉,荧光粉未明显沉淀;静置 0~90 min 时,提取区域内的荧光粉迅速减少,大量荧光粉迅速沉淀,积聚在支架反射杯和 LED 芯片表面形成沉淀物,荧光粉的纵向分布不再均匀;静置 90 min 时,提取区域内具有少量荧光粉,荧光粉沉淀物基本成形,荧光粉的纵向分布出现明显分层;静置 90~180 min 时,提取区域内的荧光粉缓慢减少,少量荧光粉继续缓慢沉淀,荧光粉沉淀物的形态变化轻微,荧光粉的纵向分层愈加明显;静置 180 min 时,提取区域内仅有些微荧光粉,这些荧光粉仍在继续沉淀,荧光粉沉淀物与其上方的硅树脂之间具有清晰的边界。

由于荧光粉沉淀物在静置 90 min 时基本成形,其后续形态未有明显改变,可以认为静置 90 min 后白光 LED 的荧光粉已经基本沉淀。此外,从 OCT 图像中

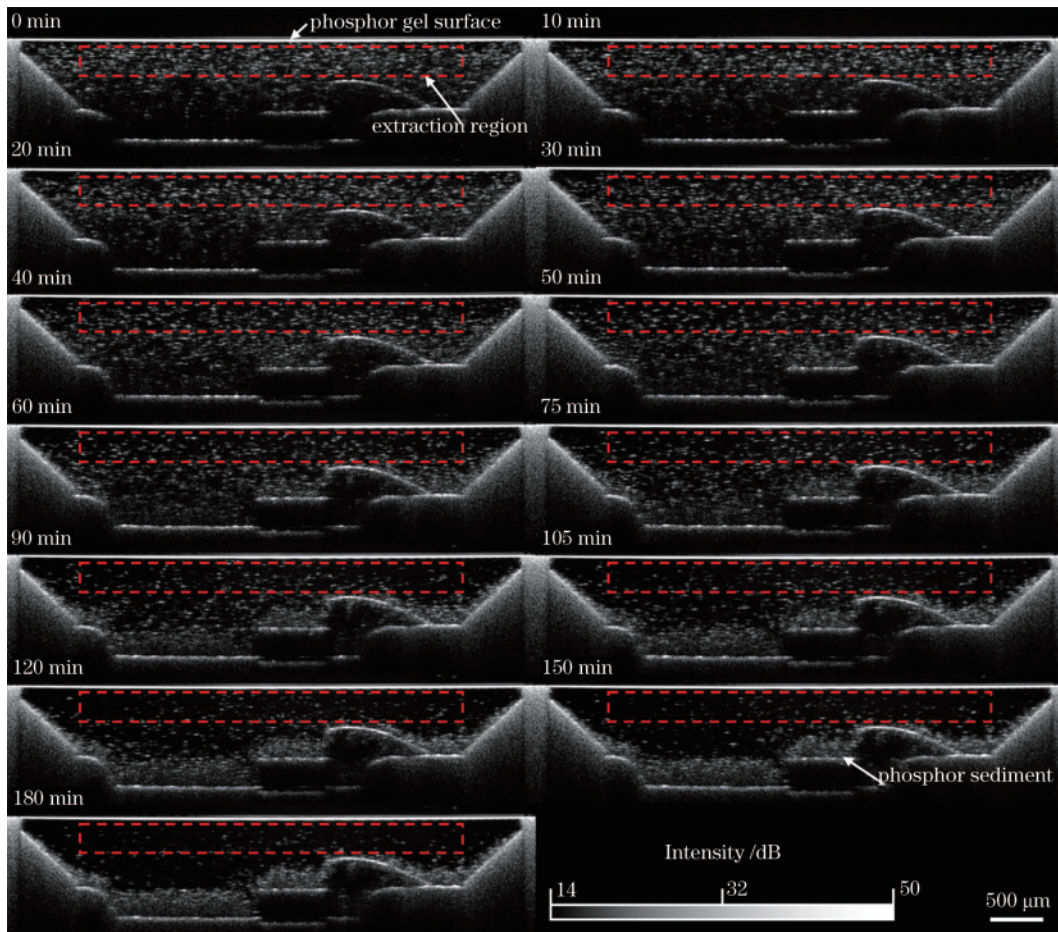


图 6 不同静置时间的白光 LED OCT 图像

Fig. 6 White LED OCT images with different standing time

可以观察到,静置 90 min 前主要是粒径较大的荧光粉快速沉淀,静置 90 min 后则主要为粒径较小的荧光粉缓慢沉淀,OCT 图像中的荧光粉沉淀过程呈现出先快后慢的特点。而由斯托克斯定律^[5]可知,荧光粉的沉淀速度与粒径成正比,若荧光粉粒径不完全一致,荧光粉沉淀过程将呈现出先快后慢的特点,OCT 图像中的荧光粉沉淀过程与此相符。以上分析结果表明,OCT 图像可以反映白光 LED 内荧光粉沉淀的整个连续过程,并且荧光粉面积分数提取区域内的荧光粉减少与荧光粉沉淀是同步的,同理,荧光粉面积分数的变化也将与荧光粉沉淀同步。

不同静置时间的荧光粉面积分数如图 7 所示,其中,从图 6 所示单个白光 LED 的 OCT 图像中提取的荧光粉面积分数的变化曲线不光滑,而从 14 个白光 LED 的 OCT 图像中提取荧光粉面积分数后计算的平均荧光粉面积分数的变化曲线更为光滑,这表明多个白光 LED 的平均荧光粉面积分数可以更好地反映荧光粉面积分数的变化规律。白光 LED 静置期间,平均面积分数持续减小:静置 90 min 前,迅速从 25.22% 减小至 2.19%;静置 90 min 后,则从 2.19% 缓慢减小至 0.58%。平均面积分数减小过程呈现出先快后慢的特点,这与图 6 中荧光粉沉淀过程先快后慢的特点一致,

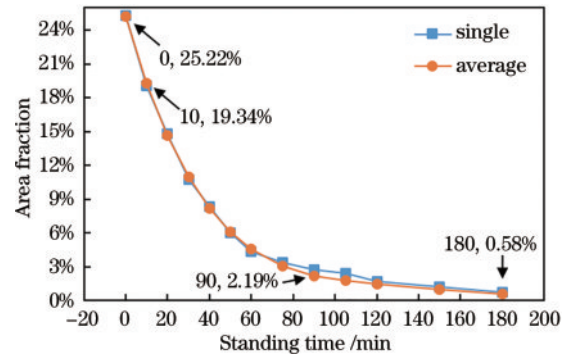


图 7 不同静置时间的荧光粉面积分数

Fig. 7 Area fraction of phosphor with different standing time

并且平均面积分数减至 2.19% 的低位后,开始缓慢减少的时间点也与图 6 中荧光粉基本沉淀的时间点一致,这表明 OCT 图像中的荧光粉面积分数可以量化荧光粉沉淀程度,在工艺研究中可以根据荧光粉面积分数的变化规律确定合适的工艺参数,在质量检测中也可将荧光粉面积分数作为判断白光 LED 合格与否的依据。

由于平均荧光粉面积分数减至 2.19% 时荧光粉基本沉淀,而离心工艺本质是加快荧光粉的沉淀速度,对于离心工艺封装的同型白光 LED,离心时间可至少

设定为离心处理期间平均荧光粉面积分数减小至 2.19% 所用的时间,以在短时间内取得足够好的沉淀效果,提升生产效率。由于白光 LED 静置 10 min 内平均荧光粉面积分数减小最快,此时荧光粉沉淀速度最快,对于常规工艺封装的同型白光 LED,涂覆荧光胶后的静置时间应控制在 10 min 内,并尽可能缩短静置时间,同时,平均荧光粉面积分数也应控制在 19.34% 以上。

图 8 中,5730 SMD 白光 LED 在封装过程中以 280 个为一组(14 排 20 列),由于整组白光 LED 涂覆荧光胶的耗时通常不超过 1 min,每个白光 LED 发生荧光粉沉淀的时间差较小,可以认为整组白光 LED 的荧光粉沉淀程度一致。在白光 LED 静置或离心结束后的质检环节中,按抽样检测的方式,使用 OCT 系统按图 8 中虚线所示路径扫描 14 个白光 LED,根据算法提取 14 个白光 LED 的荧光粉面积分数并计算平均面积分数,将平均面积分数作为整组白光 LED 的荧光粉面积分数。比较平均面积分数和图 7 中确定的决策阈值,对于常规工艺封装的同型白光 LED,若平均面积分数小于 19.34%,整组白光 LED 可判断为荧光粉严重沉淀的不合格产品;对于离心工艺封装的同型白光 LED,若平均面积分数大于 2.19%,整组白光 LED 则可判断为荧光粉沉淀不充分的不合格产品,需要进行离心处理。

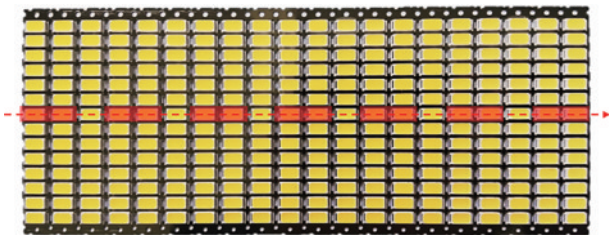


图 8 整组白光 LED 与 OCT 扫描路径

Fig. 8 Whole set of white LED and OCT scan path

5 结 论

针对白光 LED 的荧光粉沉淀检测需求,开展基于 OCT 技术的荧光粉沉淀检测方法研究,使用 OCT 系统获取白光 LED 的 OCT 图像,通过与白光 LED 切片图像的比较分析了荧光粉的数量分布与沉淀物形态。根据荧光粉沉淀过程中荧光粉数量的变化特点以及荧光粉面积分数与数量的关系,设计了基于 OCT 图像的荧光粉面积分数提取算法,分析了面积分数与荧光粉沉淀程度的关系。实验结果表明:OCT 技术可以准确地检测白光 LED 的荧光粉沉淀物形态;荧光粉在 OCT 图像中的面积分数可以量化荧光粉沉淀程度。基于 OCT 技术的方法可以满足荧光粉沉淀无损、非接触、快速、准确的检测要求,相比于金相切片法,该方法可以更加高效便捷地获取荧光粉沉淀的信息,并易于与计算机算

法结合实现自动化检测,显著提升白光 LED 产品质量检测和封装工艺研究中的荧光粉沉淀检测效率。由于设备条件限制,本研究没有使用离心机开展荧光粉沉淀检测实验,这有待在未来进一步完成。

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] Nair G B, Swart H C, Dhoble S J. A review on the advancements in phosphor-converted light emitting diodes (pc-LEDs): phosphor synthesis, device fabrication and characterization[J]. *Progress in Materials Science*, 2020, 109: 100622.
- [3] Sommer C, Reil F, Krenn J R, et al. The impact of inhomogeneities in the phosphor distribution on the device performance of phosphor-converted high-power white LED light sources[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3226-3232.
- [4] Hu R, Wang Y M, Zou Y, et al. Study on phosphor sedimentation effect in white light-emitting diode packages by modeling multi-layer phosphors with the modified Kubelka-Munk theory[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(6): 063108.
- [5] Wang Y M, Zheng H, Hu R, et al. Modeling on phosphor sedimentation phenomenon during curing process of high power LED packaging[J]. *Journal of Solid State Lighting*, 2014, 1(1): 1-9.
- [6] Yu X J, Shu W C, Hu R, et al. Dynamic phosphor sedimentation effect on the optical performance of white LEDs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(14): 1195-1198.
- [7] 庄允益, 王勇, 李占国, 等. 荧光粉沉降对发光二极管光色特性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 101601.
- [8] Zhuang Y Y, Wang Y, Li Z G, et al. Effect of phosphor sedimentation on photochromic properties of light emitting diodes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 101601.
- [9] Wang H Y, Li J S, Zhao X Z, et al. Study on optical consistency of centrifuged LEDs in packaging processes [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2019, 9(7): 1376-1387.
- [10] Kim W J, Kim T K, Kim S H, et al. Improved angular color uniformity and hydrothermal reliability of phosphor-converted white light-emitting diodes by using phosphor sedimentation[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28634-28640.
- [11] 李培, 杨姗姗, 丁志华, 等. 傅里叶域光学相干层析成像技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(2): 0207011.
- [12] Li P, Yang S S, Ding Z H, et al. Research progress in Fourier domain optical coherence tomography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(2): 0207011.
- [13] 薛平. 高性能光学相干层析成像的研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1517001.
- [14] Xue P. Development of high-performance optical coherence

- tomography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1517001.
- [12] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [13] 王玲, 郝健, 王中昆, 等. 制造辅助的光学相干层析成像方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1111003.
Wang L, Hao J, Wang Z K, et al. Study on manufacturing-aid optical coherence tomography[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1111003.
- [14] 王驰, 温珠莉, 孙建美, 等. 基于超小自聚焦光纤探头的 SS-OCT 测振方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1511002.
Wang C, Wen Z L, Sun J M, et al. Research on SS-OCT vibration measurement method based on ultra-small GRIN fiber probe[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1511002.
- [15] 梅杰. 基于光学相干断层扫描技术的非侵入式 LED 结温研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2015.
Mei J. Study on junction temperature of non-invasive LED based on optical coherence tomography technology [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2015.
- [16] Lee Y J, Chou C Y, Huang C Y, et al. Determination on the coefficient of thermal expansion in high-power InGaN-based light-emitting diodes by optical coherence tomography[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-9.