

湿热环境下LED荧光粉的性能退化规律及机理研究

樊嘉杰^{1,2}, 王珍^{1,2}, 罗潇^{1,2}, 周玲^{1,2}, 樊学军³, 张国旗⁴

(1. 河海大学, 江苏 常州 213022)

(2. 常州市武进区半导体照明应用技术研究院, 江苏 常州 213161)

(3. 美国拉玛尔大学, 德克萨斯 博蒙特 77710)

(4. 荷兰代尔夫特理工大学, 代尔夫特 2628)

摘要: 选用制备高品质白光LED所常用黄、红、橙3种荧光粉, 研究其在高温高湿老化试验和浸水模拟饱和水环境实验中的发光性能、发热性能、晶体结构和微观颗粒形貌变化规律, 分析不同荧光粉的性能退化机理。结果表明: (1) 在湿热环境下荧光粉易与水发生反应产生OH⁻, 提升湿环境pH值, 引起主体晶体结构结晶度下降, 晶格振动增强, 光致发热能量增加, 诱发猝灭效应; 同时荧光粉表面粗化效应增加蓝光散射, 降低蓝光吸收和转化效率; (2) 在浸水模拟实验的饱和水环境中, 荧光粉的发光性能和发热性能变化规律与高温高湿长期老化试验结果一致, 可以有效评估LED荧光粉在湿热环境下可靠性。

关键词: 白光LED; 荧光粉; 高温高湿; 浸水模拟实验; 失效机理

中图分类号: O482.91

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)01-0153-08

随着大功率白光发光二极管(LED)技术的飞速发展, 传统白炽灯和荧光灯逐渐被取代^[1,2]。近几年来, 人们对照明的要求开始从节能环保逐渐转向对健康舒适的追求, 下一代白光LED不仅仅需要低成本和高光效, 更须满足健康、舒适、高光色品质、低频闪、高可靠性等需求。具有高显色指数的全光谱白光LED在室内照明、医疗健康照明、植物照明、特种显示、汽车照明等应用领域的潜力巨大, 是未来照明技术的重要发展方向。大功率白光LED封装通常由蓝光芯片、YAG黄色荧光粉和封装材料组成, 其发光原理是蓝光激发黄色荧光粉转换成黄光, 再经蓝光与黄光混合成白光^[3-5]。然而, 由于红光和绿光部分光谱的缺失使得传统黄色荧光转换型LED的显色指数偏低, 这对实现高品质、全光谱白光LED提出了考验。因此, 选择合适、稳定的荧光粉材料对实现高品质和高可靠白光LED至关重要^[6-8]。

通常LED工作时, 涂覆在芯片上的荧光粉/硅胶复合材料会受高温、高湿和强蓝光照射的影响, 这将加速荧光粉量子效率和封装材料性能的退化, 从而导致LED光源的流明效率降低和色坐标发生漂移^[9-11]。例如, M. D. Lago等人^[12]研究了远程荧光粉在高温加

速条件下的老化机理和可靠性, 发现高温可以加速荧光粉的老化, 具体表现为降低荧光转化效率, 改变其光-色性能。M. Choi等人^[9]提出了LED在高温高湿实验中荧光粉的老化可能是由于荧光粉在湿气环境下发生水解反应造成的, 并通过直接测量荧光粉的pH值变化来验证荧光粉的水解反应机理。J. L. Huang等人^[13]发现中功率白光LED在高温高湿可靠性测试后会发生硅胶碳化现象, 并将其归因于焦耳热、荧光粉自发热以及湿气条件下硅胶对蓝光过度吸收等。在LED封装器件中单一黄色荧光粉自发热机理、实验和模型方面, 华中科技大学学者^[14]从荧光粉的加入导致硅胶碳化现象出发, 分析了YAG黄色荧光粉自发热的的原因, 并建立了荧光粉颗粒的自发热模型, 预测荧光粉自发热最高温度可以达到540.16℃。然而LED的结温一般无法达到此温度, 所以推测荧光粉自发热是导致硅胶碳化的主要原因。材料学者通常提出新型荧光粉的制备方法^[15,16], 通过瞬态光致发光机制和热猝灭试验来评估荧光粉的稳定性^[17-19]。也有学者研究了湿气加速荧光粉瞬态发光性能衰减机理^[20-22]。但是, 在长期湿热环境的老化过程中, 同时考虑多种荧光粉的光致发光性能和光致发热性能退化规律, 对制备高

收稿日期: 2019-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(51805147, 61673037); 江苏省六大人才高峰项目(GDZB-017); 中央高校基本科研业务费专项资金(2017B15014)

作者简介: 樊嘉杰, 男, 1983年生, 博士, 副教授, 河海大学机电工程学院, 江苏常州213022, 电话: 0519-85191933, E-mail: jay.fan@connect.polyu.hk, jiajie.fan@hhu.edu.cn

品质和高可靠白光 LED 更有意义。

本实验以制备高品质白光 LED 常用的黄、红、橙 3 种荧光粉为研究对象, 通过分析其发射光谱和热效应, 研究其在长期高温高湿加速老化试验(85 °C, 85%) 中的光致发光性能和光致发热性能的变化规律。此外, 还通过浸水模拟实验研究饱和水环境中荧光粉的水解机理, 以及该过程中荧光粉的光致发光性能、光致发热性能变化规律, 并利用 X 射线衍射 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 对其微观退化机理进行分析。

1 实 验

选取了来自 Intematix 的 3 种常用单色荧光粉, 分别为 YAG 黄粉 (代号: YAG04)、氮化物基红粉 (代号: R6535) 和硅酸盐基橙粉 (代号: O5544), 如图 1 和表 1 所示。该 3 种单色荧光粉通常用于制备高品质白光 LED 光源。

研究方案和实验设计如图 2 所示。主要实验包括: 长期高温高湿 (85 °C, 85%RH) 老化试验和浸水模拟实验。材料性能表征测试主要包括: 基于荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统的光谱分析、基于热成像仪的光致发热分析、XRD 晶体结构分析和 SEM 显微形貌分析。

2 结果与分析

2.1 高温高湿老化试验结果分析

2.1.1 光致发光性能随老化时间的变化规律

采用远方 EX-1000 荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统分别测试 3 种单色荧光粉经过高温高湿环境 (85 °C, 85%RH) 老化后的发射光谱。

如图 3 所示, 经过 1500 h 老化后, 3 种单色荧光

粉的发光强度均下降, 分别下降至初始值的 93%, 97% 和 87%; 3 种单色荧光粉的峰值波长和半波宽 FWHM 保持相对稳定。但是, 橙色荧光粉 O5544 的发射峰值下降速率和幅度最大, 其半波宽 FWHM 上升速率和幅度最大。这表明: 橙粉 O5544 在高温高湿环境下的长期稳定性最差, 发光强度和颜色纯度性能均出现较大程度的退化。

2.1.2 光致发热性能随老化时间的变化规律

为了研究荧光粉的光致发热性能, 首先通过有限元仿真模拟荧光粉的光致发热现象。如图 4a, 4b 所示, 首先采用密排六方结构构建荧光粉的紧密堆积基本单



图 1 实验样品

Fig.1 Experimental samples

表 1 3 种荧光粉的基本信息

Table 1 Main information of three phosphors

No.	Host composition	Particle size	Color coordinates
YAG04	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	D50V-5~17 μm	X=0.444 Y=0.536
R6535	CaAlSiN ₃	D50V-15.5 μm	X=0.643 Y=0.356
O5544	(Ba, Sr) ₃ SiO ₅	D50V-16.5 μm	X=0.553 Y=0.44

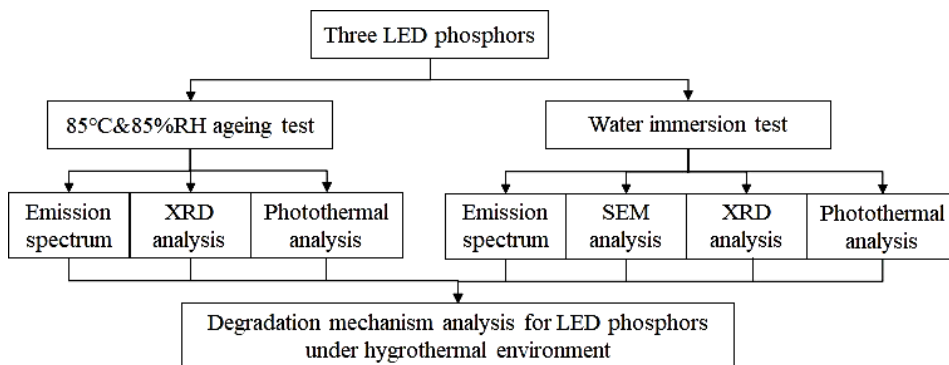


图 2 研究方案流程图

Fig.2 Flowchart of the research plan

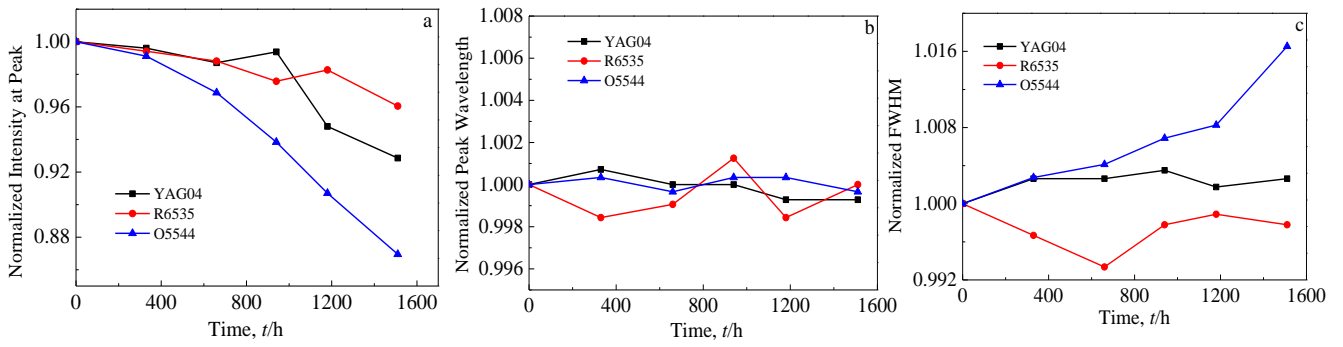


图 3 3 种荧光粉发射光谱特征值与老化时间关系

Fig.3 Emission characteristics of three phosphors vs. aging time: (a) normalized intensity at peak, (b) normalized peak wavelengths, and (c) normalized FWHMs

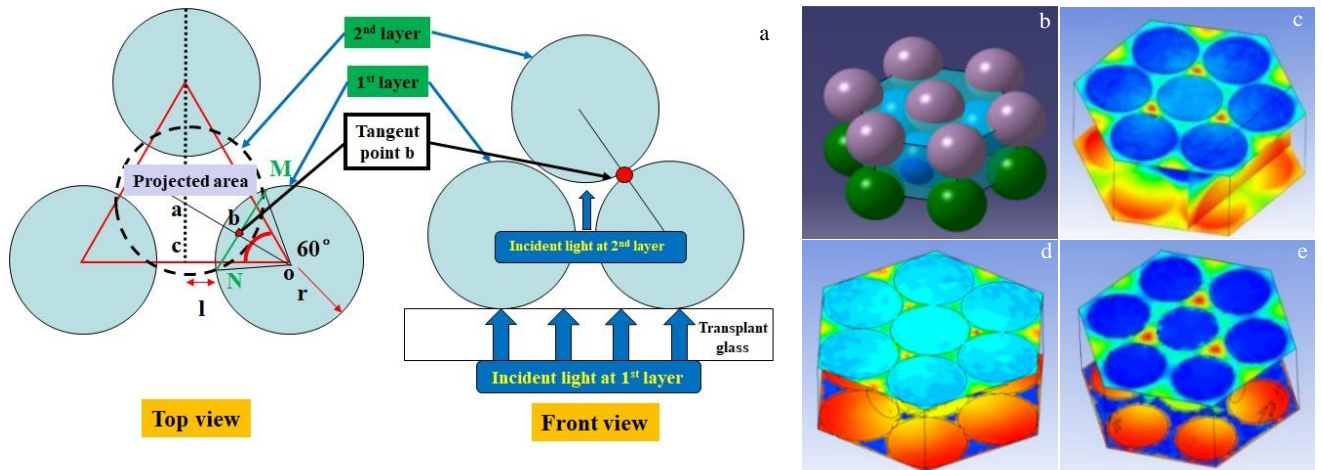


图 4 荧光粉的密排六方堆积模型及不同颗粒间距的仿真结果

Fig.4 Close-packed hexagonal structure (a, b) and the thermal simulation results for different particle spacings: (c) 2.0r, (d) 2.2r, and (e) 2.4r

元模型。假设宏观模型为该基本结构单元的累积，不考虑缺陷或杂质。 r 为荧光粉颗粒半径，取 $r=10 \mu\text{m}$ 。考虑荧光粉与空气之间的热交换，本研究通过布尔运算将六方空气盒和荧光粉颗粒装配在一起。

通过仿真模拟研究了荧光粉颗粒间距对温度梯度的影响，颗粒间距分别设置为 $2.0r, 2.1r, 2.2r, 2.3r, 2.4r$ 。图 4c~4e 是颗粒间距为 $2.0r, 2.2r, 2.4r$ 的仿真结果。结果表明：随着荧光粉颗粒间距增大，颗粒间空气阻热效应增加，造成了荧光粉紧密堆积模型中的温度梯度增加。如图 5 所示，本研究还利用非线性拟合构建了颗粒间距和温度梯度之间的关系，发现其满足对数函数关系：

$$y=658.4\ln x-1495.4 \quad (1)$$

为了测量荧光粉在高温高湿老化前后的光致发热性能，设计了荧光粉温度测试装置，如图 6a 所示。该

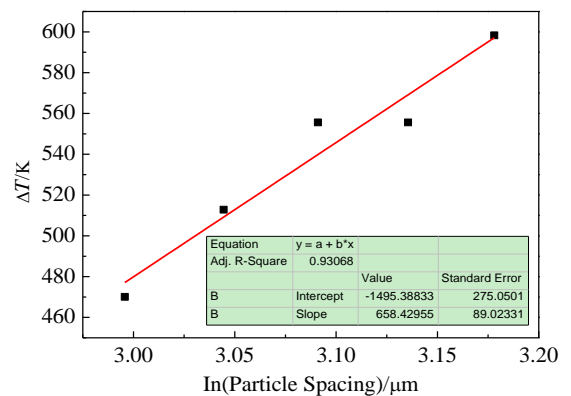


图 5 荧光粉颗粒间距与温度梯度之间的关系

Fig.5 Temperature gradient vs. phosphor particle spacing

装置由红外热成像仪、控温平台、峰值波长为 425 nm 的 LED 蓝光芯片、带圆孔的导光板、带有深 0.2 mm 直径为 14 mm 圆柱形凹槽的荧光粉承载玻璃片（尺寸为 4 cm×4 cm×0.5 mm）组成，如图 6b 所示。在本实验中，以 LED 蓝光芯片为激发光源，利用控温平台保持 LED 蓝光芯片的基板温度为 30 °C。在不同驱动电流下控制光源的激发光强度，待热平衡后利用红外热成像仪对荧光粉表面热分布进行测量。

表 2 为当 LED 蓝光芯片的驱动电流为 350 mA 时，3 种单色荧光粉经过 1500 h 老化前后的热成像图对比。结果表明：经高温高湿老化后 3 种荧光粉的表面温度均提高，其中，橙粉 O5544 的温度增量最高。结合上文中高温高湿条件下荧光粉的光致发光性能变化规律，从能量守恒角度分析，当光致发光能量下降，荧光粉的光转换效率降低，导致光致发热能量升高，荧光粉表面温度升高。由此可见，从光致发热测量结果也可以证明所选橙粉 O5544 在高温高湿环境下的长期稳定性和可靠性较差。

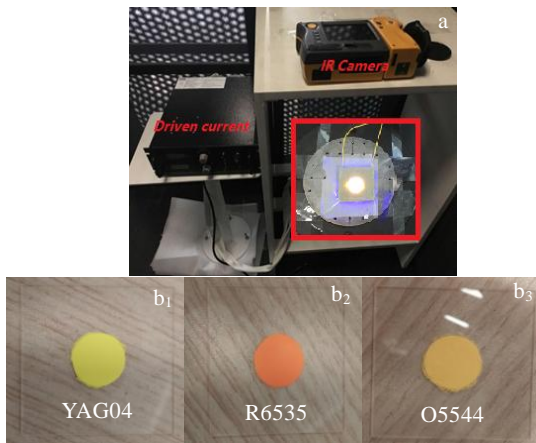
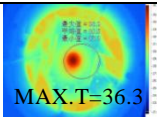
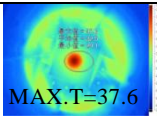
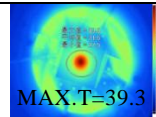
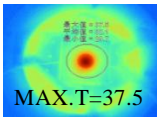
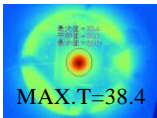
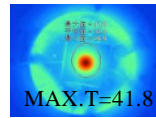


图 6 荧光粉光致发热性能测试测量装置及测试样品
Fig.6 Test temperature fixture (a) and test samples (b)

表 2 1500 h 老化前后 3 种荧光粉的热成像图

Table 2 Thermal imaging of three phosphors before and after 1500 h ageing ($I_f = 350 \text{ mA}$) (Temperature unit °C)

	YAG04	R6535	O5544
Before ageing	 MAX.T=36.3	 MAX.T=37.6	 MAX.T=39.3
After ageing	 MAX.T=37.5	 MAX.T=38.4	 MAX.T=41.8

2.1.3 晶体结构分析

荧光粉材料组成和结构是决定其性能的基本因素。采用 X 射线衍射 (XRD) 对老化前后荧光粉的晶体结构进行分析，以检测其晶体结构变化。

3 种单色荧光粉在 1500 h 高温高湿环境老化前后的 XRD 对比图谱如图 7 所示。根据布拉格定律： $2d\sin\theta=n\lambda$ 。图中可以知道黄粉 YAG04、红粉 R6535 和橙粉 O5544 的最强特征峰分别在 $2\theta=33.3^\circ$ 、 37.2° 、 31.1° 。对比标准卡 JCPDS，3 种单色荧光粉的衍射峰与标准卡片的衍射峰吻合度很好，由此可见：黄粉 YAG04 为单一 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 相，红粉 R6535 为单一 CaAlSiN_3 相，橙粉 O5544 为单一 $(\text{Sr}, \text{Ba})_3\text{SiO}_5$ 相^[6]。

此外，如表 3 所示，通过比较荧光粉老化前后的最强特征峰的强度变化可知：老化后荧光粉的最强特征峰强度均出现不同程度下降，3 种单色荧光粉

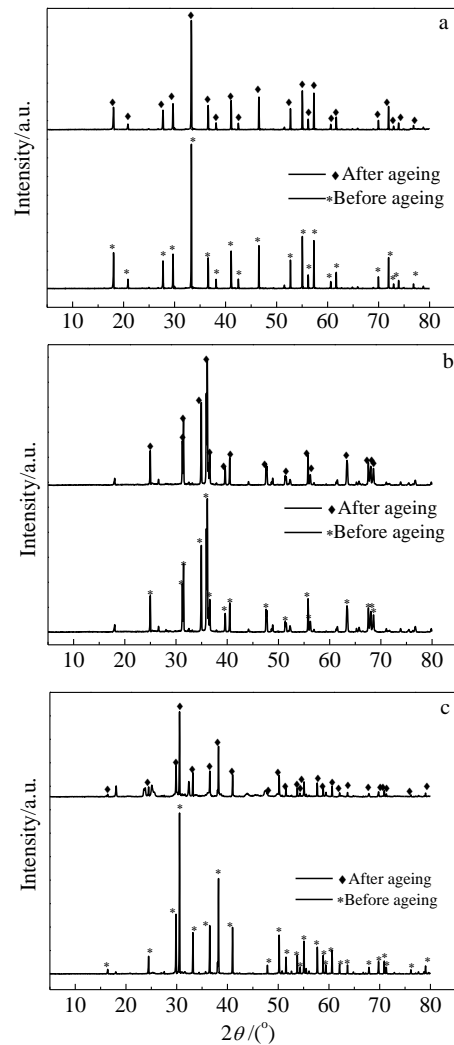


图 7 1500 h 老化前后 3 种荧光粉的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of three phosphors before and after 1500 h ageing: (a) YAG04, (b) R6535, and (c) O5544

YAG04、R6535、O5544 的下降幅度分别为初始强度的 85%，80%，58%。进一步表明：高温高湿环境下荧光粉的结构变差，结晶度下降，其中，橙粉 O5544 衍射峰强度下降最快，这也从微观晶体结构变化方面解释了其在高温高湿环境下稳定性和可靠性差的原因。

2.2 浸水模拟实验结果分析及讨论

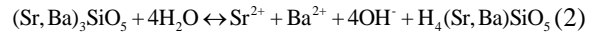
为了进一步探索荧光粉在高温高湿环境下性能退化的机理，设计并进行了荧光粉的浸水模拟实验，通过测量不同阶段溶液 pH 值、荧光粉的光致发光性能、光致发热性能和微观结构，以研究饱和水环境中荧光粉的水解反应机理。

2.2.1 pH 值随浸泡时间的变化规律

为了检测水和荧光粉的相互作用，将 3 种荧光粉直接放入去离子水中测试水溶液的 pH 值变化。具体操作流程如图 8 所示：首先取 0.2 g 荧光粉放入 40 mL 去离子水中；然后，用磁力搅拌器将水和粉搅拌均匀并控温，同时利用 pH 测试仪原位检测溶液 pH 值变化。

图 9 显示经过 1600 s 浸泡后 3 种荧光粉的 pH 值均上升，且在 200 s 内急剧上升，以后趋于平稳，这

表明：3 种荧光粉均发生了不同程度的水解反应，pH 值上升说明水解反应中产生了大量的 OH⁻，由此推断橙粉 O5544 和红粉 R6535 的水解反应方程式如(2)，(3)所示^[6]。其中，橙粉 O5544 水溶液的 pH 值上升幅度最大，水解反应最剧烈，这也从另一方面表明橙粉 O5544 的耐水性较差。



2.2.2 光致发光性能随浸泡时间的变化规律

通过测量不同浸泡时间下 3 种荧光粉发射光谱的峰值强度、峰值波长和半波宽来表征其光致发光性能。

表 3 1500 h 老化前后荧光粉 XRD 最强特征峰强度

Table 3 XRD peak intensity of phosphors before and after 1500 h ageing

Ageing time/h	YAG04	R6535	O5544
0	74000	27500	50000
1500	63000	22000	29000

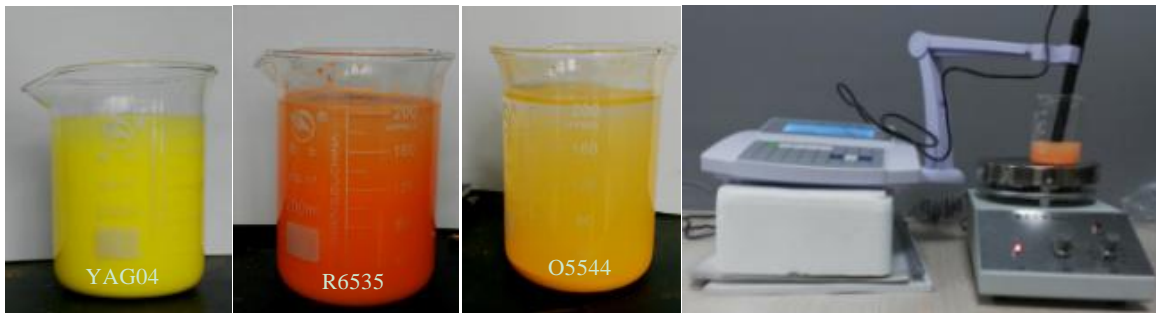


图 8 3 种荧光粉水溶液及浸水模拟实验中 pH 值测试

Fig.8 Phosphor solutions and pH measurement in water immersion test

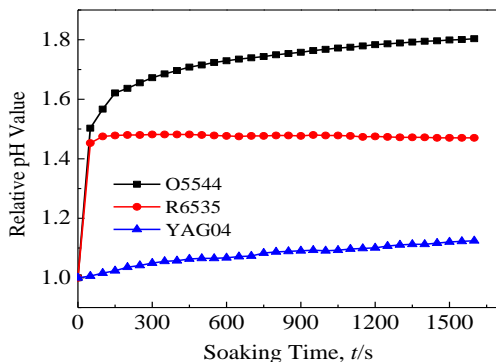


图 9 3 种荧光粉水溶液 pH 值随浸泡时间的变化

Fig.9 pH values of three phosphor solutions vs. soaking time

取样和测试流程为：首先称取以上 3 种荧光粉各 20 g，分别放入 200 mL 的去离子水中，用玻璃棒搅拌均匀；然后静置 200 s，用滤纸过滤并在加热平台上烘干；在烘干后的 3 种单色荧光粉中分别取 10 g，放入 100 mL 去离子水中继续反应，静置 1800 s 后再取出过滤烘干；最后，采用远方光电 EX-1000 荧光粉激发光谱和热猝灭分析系统测量不同浸水时间时荧光粉的发射光谱。

测量结果如图 10 所示，在饱和水环境中浸泡 1800 s 后，橙粉 O5544 的发射峰值下降速率最大和半波宽上升速率最大，该现象与高温高湿环境老化后的光致发光性能变化规律一致。以上结果说明荧光粉在湿环境下发生水解反应是引起其光转换效率降低的主要原因。

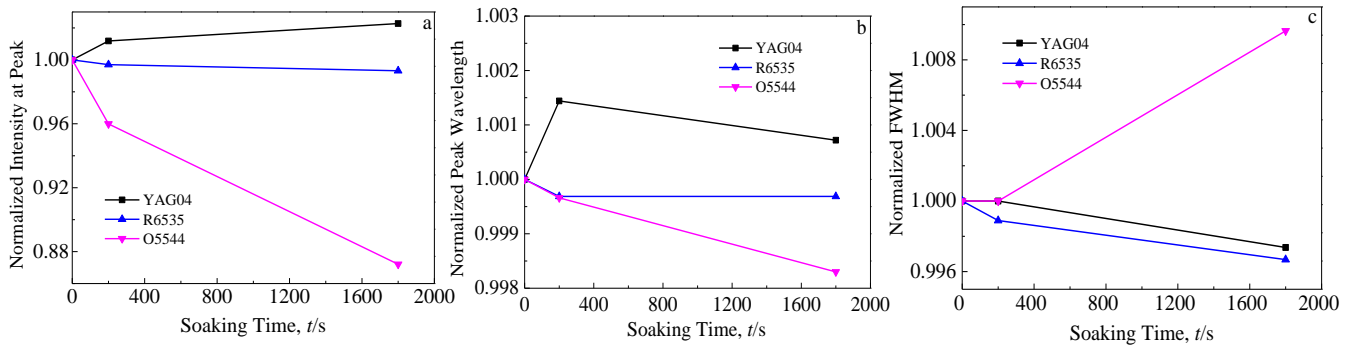


图 10 3 种单色荧光粉发射光谱特征值随浸泡时间的变化

Fig.10 Emission characteristics of three phosphors vs. soaking time: (a) normalized intensity at peak, (b) normalized peak wavelengths, and (c) normalized FWHMs

2.2.3 光致发热性能随浸泡时间的变化规律

运用荧光粉温度测试装置对 3 种荧光粉在饱和水环境中浸泡不同时间后的光致发热性能进行测量。表 4 为 3 种荧光粉表面温度的变化情况，由表可知：

表 4 3 种荧光粉的热成像图随浸泡时间的变化

Table 4 Thermal imaging of three phosphors vs. soaking time ($I_T=150$ mA) (Temperature unit $^{\circ}\text{C}$)

Soaking time/s	YAG04	R6535	O5544
0	MAX.T=38.6	MAX.T=42.1	MAX.T=43.8
200	MAX.T=38.9	MAX.T=42.6	MAX.T=44.6
1800	MAX.T=39.3	MAX.T=43.1	MAX.T=45.6

浸泡时间越长，3 种荧光粉表面温度上升越大，且橙粉 O5544 温升最高，这与其高温高湿老化测试结果一致。

2.2.4 晶体结构及微观颗粒形貌分析

为了探索荧光粉浸泡在去离子水中其晶体结构随时间的变化规律，对 3 种单色荧光粉在饱和水环境中不同浸泡时间时的 XRD 谱图进行分析，如图 11 所示。

表 5 对比 3 种荧光粉在饱和水环境中不同浸泡时间时的最强衍射峰强度，结果显示：3 种荧光粉的衍射峰强度都显著下降，表明浸泡去离子水后的荧光粉发生了水解使其结构变差，结晶度下降，而且橙粉 O5544 水解速率最快，该现象与高温高湿环境老化后的金相结构变化规律一致。为了进一步确认荧光粉在去离子水中发生了水解反应，采用扫描电子显微镜 (SEM) 对比分析浸水实验前后荧光粉颗粒表面形貌变化。如图 12 可知，3 种荧光粉颗粒表面都变粗糙，其中橙粉 O5544 表面粗化最明显。

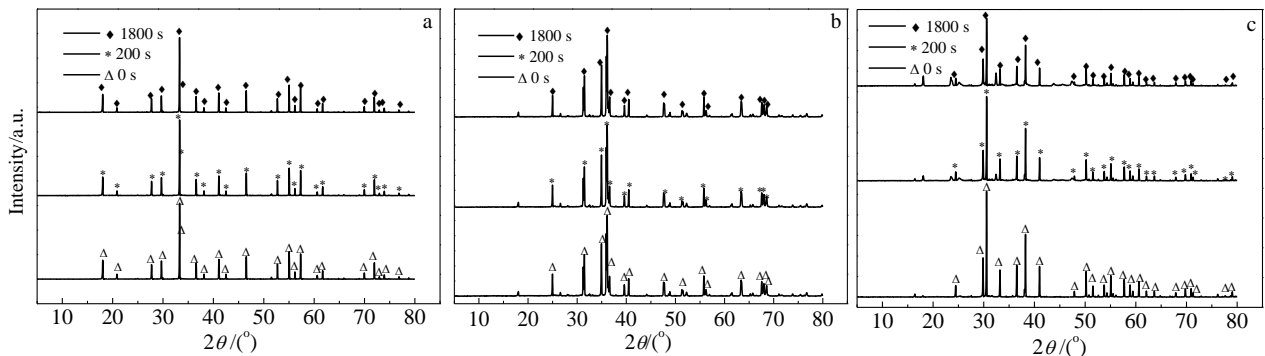


图 11 3 种荧光粉 XRD 图谱随浸泡时间的变化

Fig.11 XRD patterns of three phosphors vs. soaking time: (a) YAG04, (b) R6535, and (c) O5544

综上所述，从湿热环境中荧光粉晶体结构和微观颗粒形貌变化，可以判断引起其光致发光性能退化的主要原因是荧光粉发生水解反应，该反应首先导致荧光粉主体晶体结构结晶度下降，晶格振动增加从而引起光致发热能量增加，诱发热猝灭效应；其次，荧光粉表面粗糙度增加造成蓝光散射能量增加，蓝光吸收和转化效率降低。

表 5 荧光粉 XRD 最强特征峰强度随浸泡时间的变化
Table 5 XRD peak intensity of phosphors vs. soaking time

Soaking time/s	YAG04	R6535	O5544
0	80000	29000	54000
200	77500	26000	41000
1800	75000	25000	33000

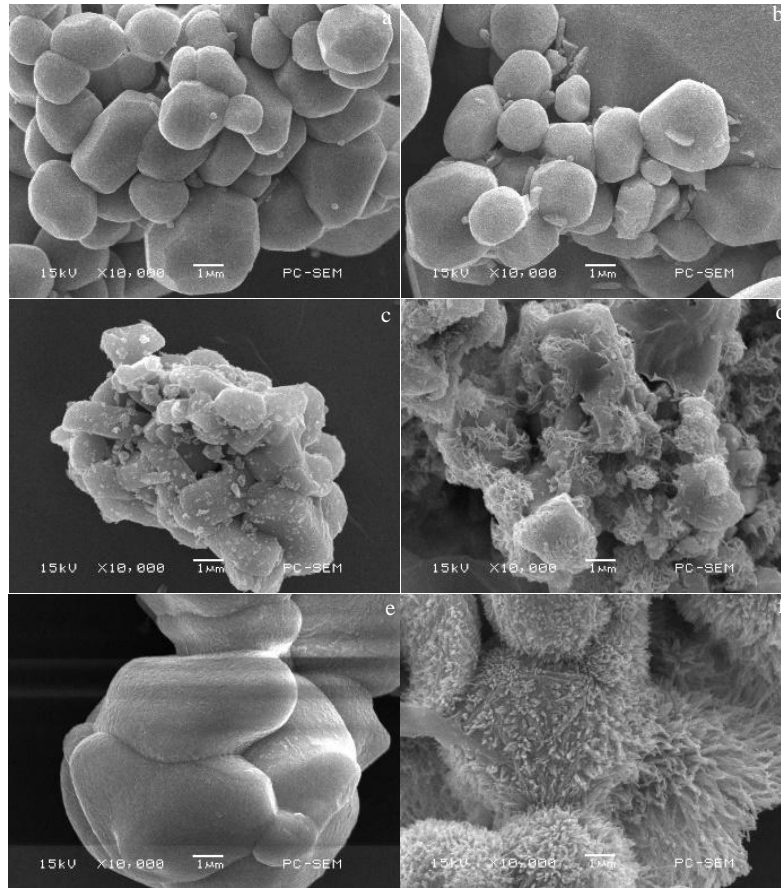


图 12 水解前后 3 种荧光粉颗粒微观形貌对比

Fig.12 Surface morphologies of three phosphors before (a, c, e) and after (b, d, f) water immersion test: (a, b) YAG04, (c, d) R6535, and (e, f) O5544

3 结 论

1) 在长期湿热环境中，荧光粉光致发光强度出现明显下降，颜色纯度也会受到影响；其次，当光致发光能量下降，荧光粉的光转换效率降低，导致光致发热能量升高，荧光粉表面温度升高；荧光粉的结构变差，结晶度下降。

2) 饱和水环境中荧光粉的模拟实验证明荧光粉与水发生反应产生 OH⁻，溶液 pH 值上升，表明发生水解反应；测试不同浸泡时间时 3 种荧光粉光致发光性

能和光致发热性能的变化规律，与高温高湿长期老化试验结果一致；晶体结构和微观颗粒形貌变化揭示了荧光粉性能退化的微观机理主要是：首先，主体晶体结构结晶度下降，晶格振动增加，光致发热能量增加，诱发热猝灭效应；其次，荧光粉表面粗化造成蓝光散射能量增加，而相对蓝光吸收和转化效率降低。

参考文献 References

[1] Liu Z, Liu S, Wang K et al. *IEEE Photonics Technology Letters*[J], 2008, 20(24): 2027

- [2] Pimpotkar S, Speck J S, Denbaars S P *et al.* *Nature Photonics*[J], 2003, 3(4): 180
- [3] Xiao Zhiguo(肖志国). *Solid State Lighting Luminescent Materials and Application*(半导体照明发光材料及应用)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014
- [4] Wen Shangsheng(文尚胜), Yao Rihui(姚日晖), Wu Yuxiang(吴玉香). *Solid State Lighting Technology* (半导体照明技术)[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2013
- [5] Chen Yu(陈宇). *LED Manufacturing Technology and Application*(LED 制造技术与应用)[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013
- [6] Fan J, Zhang M, Luo X *et al.* *Journal of Materials Science Materials in Electronics*[J], 2017, 28(23): 17 557
- [7] Hui S Y, Li S N, Tao X H *et al.* *IEEE Transactions on Power Electronics*[J], 2010, 25(10): 2665
- [8] Schubert E F, Kim J K. *Science*[J], 2005, 308(5726): 1274
- [9] Choi M, Kim K H, Yun C *et al.* *Microelectronics Reliability*[J], 2014, 54(12): 2849
- [10] Fan J, Yung K C, Pecht M. *Expert Systems with Applications*[J], 2015, 42(5): 2411
- [11] Hu J Z, Yang L Q, Shin M W. *Proceedings of 56th Electronic Components & Technology Conference 2006, Vol 1 and 2*[C]. San Diego, CA: IEEE Xplore, 2006: 1957
- [12] Lago M D, Meneghini M, Trivellin N *et al.* *Microelectronics Reliability*[J], 2012, 52(9-10): 2164
- [13] Huang J, Duan S G, Koh S *et al.* *IEEE Transactions on Device & Materials Reliability*[J], 2015, 15(4): 478
- [14] Fu Xing(付星). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [15] Ma C Y, Cao Y G, Shen X F *et al.* *Optical Materials*[J], 2017, 69: 105
- [16] Pan Y X, Chen Z, Jiang X Y *et al.* *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2016, 99(9): 3008
- [17] Gang S R, Kim D, Kim S M *et al.* *Microelectronics Reliability*[J], 2012, 52(9-10): 2174
- [18] Chen Y B, Wu K L, He J *et al.* *Journal of Materials Chemistry C*[J], 2017, 5(34): 8828
- [19] Kim Y H, Arunkumar P, Bin Im W. *Ceramics International*[J], 2015, 41(3): 5200
- [20] Tsai C C, Liou J S, Cheng W C *et al.* *Proceedings of 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*[C]. Lake Buena Vista, FL: IEEE Xplore, 2011: 1626
- [21] Withnall R, Silver J, Ghazli M *et al.* *Proceedings of the 19th International Display Workshops, Vol. 3*[J], Kyoto: International Display Workshops, 2012, 19: 1727
- [22] Zhang C N, Uchikoshi T, Xie R J *et al.* *Physical Chemistry Chemical Physics*[J], 2016, 18(18): 12 494

Degradation Mechanism Analysis for LED Phosphors under Hygrothermal Environment

Fan Jiajie^{1,2}, Wang Zhen^{1,2}, Luo Xiao^{1,2}, Zhou Ling^{1,2}, Fan Xuejun³, Zhang Guoqi⁴

(1. Hohai University, Changzhou 213022, China)

(2. Changzhou Institute of Technology Research for Solid State Lighting, Changzhou 213161, China)

(3. Lamar University, Beaumont, TX 77710, USA)

(4. Delft University of Technology, Delft 2628, the Netherlands)

Abstract: This study selects yellow, red and orange phosphors used in high color rendering white packages, analyzes their luminescence and thermal properties, crystal structures and micro morphologies during both the high temperature and high moisture ageing test and the water immersion test, and finally figures out the degradation mechanisms of different phosphors. The results show that: 1) the hydrolysis reaction of phosphors under hygrothermal environment produces OH⁻ and increases the environment's pH value, which can lower the crystallinity of phosphor hosts, increase the lattice vibration and light-induced heat, and enhance the thermal quenching effect of phosphors. Meanwhile, the surface roughening of phosphor particles can increase the blue light scattering and lower its absorption and conversion efficiency; 2) the degradation trends of both luminescence and thermal properties of phosphors under the water immersion test are similar to those under high temperature and high moisture ageing test. So it is an effective method to assess the reliability of LED phosphors under hygrothermal environment.

Key words: white LED; phosphors; hygrothermal environment; water immersion test; degradation mechanisms

Corresponding author: Fan Jiajie, Ph. D., Associate Professor, College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, P. R. China, Tel: 0086-519-85191933, E-mail: jay.fan@connect.polyu.hk, jiajie.fan@hhu.edu.cn