

## 表面粗糙度对荧光陶瓷发光性能的影响

唐燕如<sup>1\*</sup>, 蒋仁杰<sup>2</sup>, 易学专<sup>2</sup>, 周圣明<sup>2</sup>, 孙艳<sup>1,3</sup><sup>1</sup>之江实验室, 浙江 杭州 311121;<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;<sup>3</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

**摘要** 采用真空高温固相反应烧结技术制备了 Ce:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (掺杂原子数分数为 0.2%) 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合相荧光陶瓷 (简称 Ce:YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 采用蓝光发光二极管(LED)芯片, 以透射模式激发, 系统研究了退火处理对荧光陶瓷发光性能的影响以及不同厚度与不同表面粗糙度的荧光陶瓷的发光性能的变化规律。结果表明, 退火处理可明显改善荧光陶瓷的发光性能, 且在相同激发条件下, 随着荧光陶瓷厚度的增加, 透射蓝光与荧光陶瓷所发出的黄绿荧光的强度比下降, 色温降低, 发光效率升高。陶瓷表面粗糙度的增加可明显提高荧光陶瓷的发光效率。对于同一荧光陶瓷样品, 蓝光入射面的粗糙度小, 光出射面的粗糙度大, 有利于降低荧光陶瓷的色温, 提高其发光效率。

**关键词** 材料; 复合相荧光陶瓷; 表面粗糙度; 光电转换效率; 色温; 发光光谱

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230856

## 1 引言

目前, 白光照明的主要模式为蓝光发光二极管(LED)与高效荧光材料铈掺杂钇铝石榴石(Ce:YAG)相结合。蓝光LED发出的部分蓝光被Ce:YAG中的铈离子吸收后转换为黄绿荧光, 该黄绿荧光与未被吸收的蓝光一起混合出射形成白光<sup>[1]</sup>。蓝光LED功率的不断提高, 推动了大功率白光照明的发展。然而传统荧光粉混合硅胶或树脂的封装模式在高功率激发下存在材料老化问题, 不适用于大功率白光照明<sup>[2]</sup>。

针对大功率白光照明的需求, 研究者开发出高热导、耐热性能好的荧光玻璃<sup>[3-5]</sup>、荧光晶体<sup>[6-7]</sup>与荧光陶瓷<sup>[8-9]</sup>。国外研究机构研发大功率白光照明, 采用荧光玻璃与荧光陶瓷封装的技术路线。Philips Lumileds公司推出荧光陶瓷封装的高功率白光LED光源, 该白光LED主要用于汽车照明。Schott公司开发了适用于激光显示的荧光陶瓷, 目前已在显示领域投入应用。

前期我们开发设计了铈掺杂钇铝石榴石与氧化铝复合的荧光陶瓷(Ce:YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 氧化铝的引入可改变荧光陶瓷中全反射导致的无法出射的光线的传播路径, 从而提高荧光陶瓷的光出射效率<sup>[10]</sup>。因此, 本文选取Ce:YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合相荧光陶瓷作为研究对象, 系统研究了不同厚度与退火条件下表面粗

糙度对Ce:YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合相荧光陶瓷发光性能的影响。

## 2 实验

## 2.1 荧光陶瓷的制备

按(Ce<sub>0.002</sub>Y<sub>0.998</sub>)<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(质量分数为90%)与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(质量分数为10%)的成分组成, 分别称取相应质量的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CeO<sub>2</sub>粉末, 加入MgO与四乙氧基硅烷(TEOS)作为添加剂<sup>[11]</sup>, 并加入聚乙二醇-400(PEG-400)作为分散剂, 以无水乙醇作为球磨介质, 湿法球磨48 h。将所得浆料在80℃下烘干, 粉料过筛后, 再用单轴压机(压强为20 MPa)压制成型, 初步成型的素坯经冷等静压(压强为200 MPa)进一步被压实。所得坯体用马弗炉在700℃空气气氛下预烧3 h, 去除坯体中的有机成分和水分后, 利用真空烧结炉进行陶瓷烧结<sup>[12]</sup>, 保温温度为1700℃, 保温时间为5 h, 保温阶段烧结炉内的真空度优于1.0×10<sup>-3</sup> Pa。将烧结后的样品切割抛光至合适厚度。

## 2.2 荧光陶瓷的表面处理与退火处理

用激光划片机将切割抛光好的荧光陶瓷样品切割出直径为13 mm的圆片, 取碳化硼抛光粉对样品进行抛磨处理。碳化硼抛光粉型号为W2.5、W3.5、W5、W7以及W40。将抛光粉放置于平整光滑且与本研材料相同的荧光陶瓷块体上, 加入适量水, 用手将样品按压并来回摩擦。样品两面都完成手动抛磨后, 进行

收稿日期: 2023-05-23; 修回日期: 2023-06-28; 录用日期: 2023-07-19; 网络首发日期: 2023-08-07

基金项目: 上海市扬帆计划(21YF1454100)、之江实验室研究项目(113013-AL2203)

通信作者: \*tangyanru@zhejianglab.com

超声振动清洗并用清水反复冲洗,在马弗炉中对打磨完成的样品进行 800 °C 保温 200 min 的退火处理<sup>[13]</sup>。

### 2.3 发光性能测试

将蓝光 LED 固定在积分球内部支架上,将荧光陶瓷样品覆盖在蓝光 LED 芯片上,如图 1 所示,将朝向蓝光 LED 的荧光陶瓷面称为入射面或光入射面,将荧

光陶瓷的另一面称为出射面或光出射面。然而,在实际测试过程中,入射面也存在蓝光反射的情况,入射到荧光陶瓷中的蓝光以及黄绿荧光会出射。其中蓝光 LED 的波长为 468 nm,脉冲电流为 500 mA,采用积分球搭配高精度快速光谱辐射计测量,获得蓝光 LED 激发荧光陶瓷的发光光谱信息<sup>[11]</sup>。

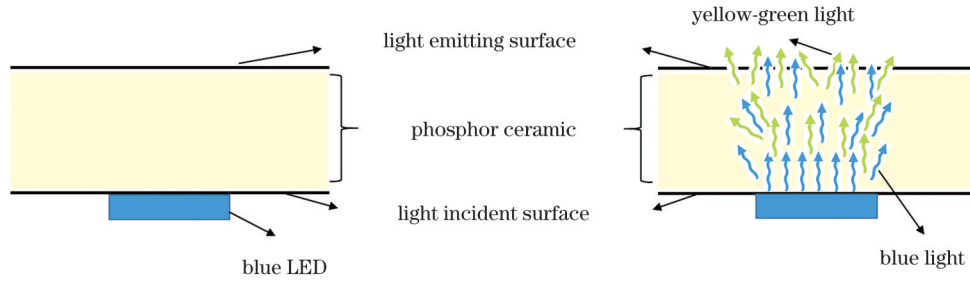


图 1 荧光陶瓷测试示意图

Fig. 1 Schematic for testing phosphor ceramic

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同厚度 Ce:YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 荧光陶瓷的发光性能

Ce:YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 荧光陶瓷经过相同的减薄工艺处理后,得到厚度分别为 0.128、0.130、0.133、0.137、0.143、0.146 mm 的样品,在马弗炉中对这些样品进行 800 °C 保温 200 min 的退火处理。将样品与发射波长为 468 nm 的蓝光 LED 芯片组合进行发光性能测试。不同厚度 Ce:YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 荧光陶瓷的发光效率(LE)与相关色温(CCT)的变化趋势如图 2 所示,随着厚度的增加,色温降低,发光效率升高<sup>[14]</sup>。利用荧光陶瓷厚度的变化可以直接调控荧光陶瓷出射光中蓝光与黄绿荧光的强度比。图 3 为不同厚度荧光陶瓷的光致发光(PL)光谱图,可以看出,随着厚度的增加,荧光陶瓷对蓝光的吸收增加且转换形成的黄绿荧光亦增加,而透射蓝光相对减少,因此色温降低。因为黄绿荧光的视见函数较蓝光的视见函数大,所以相同激发条件下黄

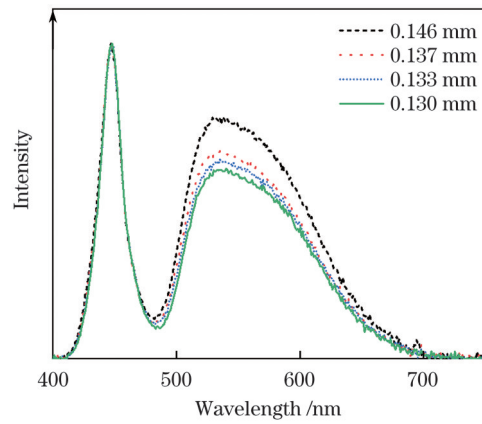


图 3 不同厚度荧光陶瓷的发光光谱图

Fig. 3 PL spectra of phosphor ceramics with different thicknesses

绿荧光越多,发光效率越高。

### 3.2 荧光陶瓷表面处理

图 4 为切割减薄后 Ce:YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 荧光陶瓷的表面状态。其中,图 4(a)为未进行碳化硼抛光处理的荧光陶瓷的表面状态(粗糙度 R<sub>a</sub>=169 nm),图 4(b)为经过 W40 碳化硼抛光处理后的荧光陶瓷的表面状态(R<sub>a</sub>=850 nm)。采用不同型号的碳化硼抛光粉对该荧光陶瓷进行表面处理,碳化硼抛光粉型号以及处理后的荧光陶瓷的表面情况如表 1 所示。本文采用的荧光陶瓷样品均为同一块 Ce:YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 荧光陶瓷分割而成,可认为所有荧光陶瓷样品的内部状态完全一致,其对蓝光的吸收效率以及转换效率相同。采用抛光粉对荧光陶瓷的表面进行处理,采用两种处理方式,第一种为采用一种型号的碳化硼抛光粉进行处理,第二种为采用不同型号的碳化硼抛光粉对荧光陶瓷的两个面进行处理,两个面分别标注为光入射面与光出射面。碳化硼抛光粉处理后的荧光陶瓷样品编号如表 2 所示。

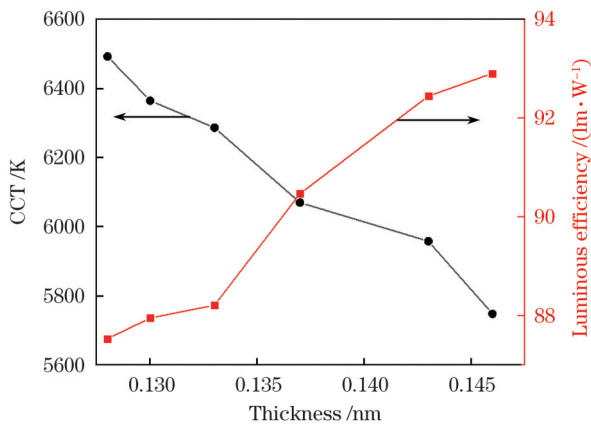


图 2 不同厚度荧光陶瓷的色温与发光效率

Fig. 2 CCTs and luminous efficiencies of phosphor ceramics with different thicknesses

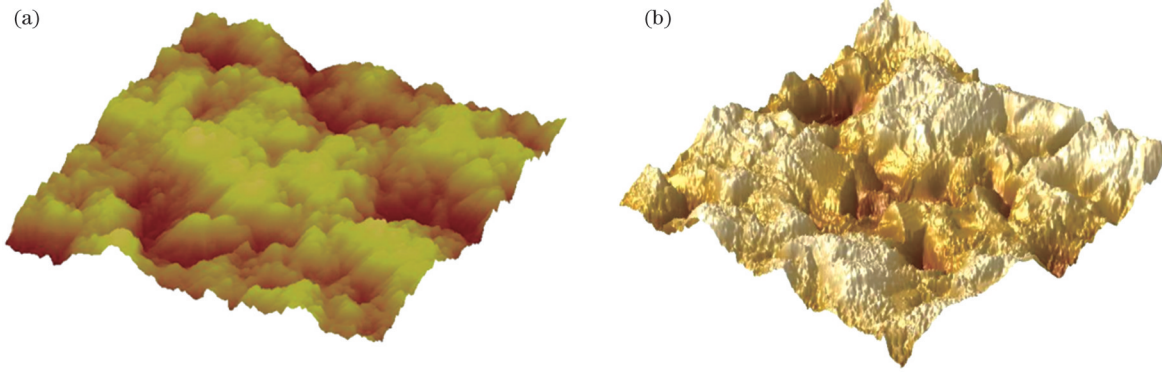


图 4 荧光陶瓷的表面粗糙度。(a)处理前;(b)处理后

Fig. 4 Surface roughnesses of phosphor ceramics. (a) Before treatment; (b) after treatment

表 1 抛光粉型号与处理后的荧光陶瓷的表面粗糙度

Table 1 Type of polishing powder and surface roughnesses of treated phosphor ceramics

Polishing powder type	Polishing powder diameter / $\mu\text{m}$	Surface roughness / nm	Polishing powder type	Polishing powder diameter / $\mu\text{m}$	Surface roughness / nm
Untreated		169	W5	5-3.5	170
W2.5	2.5-1.0	57	W7	7-5	210
W3.5	3.5-1.5	76	W40	40-28	850

表 2 荧光陶瓷表面处理方法与样品编号的对应关系

Table 2 Corresponding relationship between surface treatment method and sample No. of phosphor ceramics

Sample No.	Polishing powder type for both surfaces	Sample No.	Polishing powder type for light incident surface	Polishing powder type for light emitting surface	Sample No.	Polishing powder type for light incident surface	Polishing powder type for light emitting surface
D1	W2.5	S1-40	W2.5	W40	S40-1	W40	W2.5
D2	W3.5	S2-40	W3.5	W40	S40-2	W40	W3.5
D3	W5	S3-40	W5	W40	S40-3	W40	W5
D4	W7	S4-40	W7	W40	S40-4	W40	W7
D5	W40	S5-40	W40	W40	S40-5	W40	W40
D0	Without polishing						

### 3.3 单一抛光粉处理的荧光陶瓷的发光性能测试

荧光陶瓷的蓝光入射面与光射出面均采用同一型号的碳化硼抛光粉进行处理,且抛光处理后的荧光陶瓷厚度分别为  $H_{D0}=0.146\text{ mm}$ 、 $H_{D1}=0.143\text{ mm}$ 、 $H_{D2}=0.141\text{ mm}$ 、 $H_{D3}=0.141\text{ mm}$ 、 $H_{D4}=0.138\text{ mm}$ 、 $H_{D5}=0.138\text{ mm}$ 。对该荧光陶瓷进行光电性能测试,发现采用碳化硼抛光粉处理后,直接测试的荧光陶瓷的发光性能较  $800\text{ }^\circ\text{C}$  退火处理  $200\text{ min}$  的同一荧光陶瓷的发光性能差。如图 5 所示,热处理后的荧光陶瓷的色温未发生明显改变,但其发光效率出现明显提升,且处理的抛光粉粒径越大,荧光陶瓷的表面粗糙度越大,发光效率的提升越明显。D1 样品采用直径为  $2.5\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$  的碳化硼抛光粉进行抛磨处理,其表面粗糙度为  $57\text{ nm}$ ,表面较为光滑。然而,D4 与 D5 样品的表面粗糙度较大,其可能出现抛光粉吸附或嵌入荧光陶瓷表面的现象,进而对入射蓝光以及黄绿荧光产生损耗,从而降低荧光陶瓷的发光效率。经过热处理后,荧光陶瓷表面的杂质被去除,发光效率提高。图 6 为

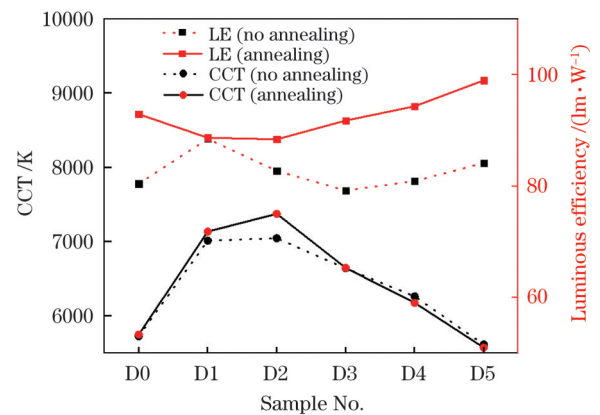


图 5 单一抛光粉处理的荧光陶瓷的发光性能

Fig. 5 Luminescent properties of phosphor ceramics treated with single polishing powder

荧光陶瓷的光致发光量子效率,可以看出,采用大粒径碳化硼抛光粉处理的荧光陶瓷,其退火处理前的量子效率相对较低,而退火后所有荧光陶瓷的光致发光量子效率较为接近。这也验证了大粒径抛光粉处理

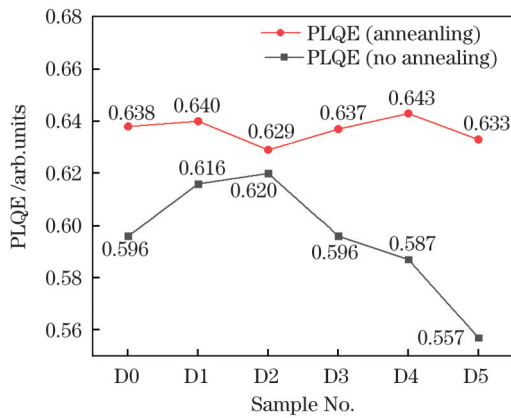


图 6 荧光陶瓷的光致发光量子效率

Fig. 6 Photoluminescence quantum efficiency of phosphor ceramic

后样品表面吸附杂质导致荧光陶瓷的量子效率以及发光效率下降。同时本文荧光陶瓷样品为同一荧光片分割而成,从退火后的光致发光量子效率来看,荧光陶瓷的量子效率相近,说明一定厚度范围(0.138~0.146 nm)内同一荧光陶瓷的光致发光量子效率(PLQE)是一定的。

对比 D0 与 D5 样品,厚度为 0.138 mm 的 D5 样品表面经过 W40 碳化硼抛光粉处理后,其色温相较于 D0 样品(未经碳化硼抛光处理,厚度为 0.146 mm)更低。荧光陶瓷的表面粗糙度越大,色温越小,发光效率越高,该结果与 Wagner 等<sup>[15]</sup>的研究结果较为一致。本文荧光陶瓷样品为同一荧光片分割而成,荧光陶瓷对蓝光的吸收效率以及量子转换效率均相同,粗糙度的增加促使色温下降,发光效率增加,说明荧光陶瓷出射光中黄绿荧光与蓝光的强度比升高,其可能原因为表面粗糙度的改变影响入射到荧光陶瓷内部的蓝光,同时影响荧光陶瓷中混合白光(蓝光+黄绿荧光)的出射。

### 3.4 不同型号抛光粉处理的荧光陶瓷的发光性能测试

荧光陶瓷的蓝光入射面与光出射面采用不同型号的碳化硼抛光粉进行处理,且抛光处理后的荧光陶瓷厚度均为(0.140±0.001)mm。根据图 5 可知,荧光陶瓷的表面粗糙度越大,荧光陶瓷的色温越低,发光效率越高,因此将荧光陶瓷样品的一个面采用 W40 碳化硼抛光粉进行处理,另一个面则采用不同型号的碳化硼抛光粉进行处理。同时为去除碳化硼抛光粉对荧光陶瓷发光性能的影响,荧光陶瓷样品均进行 800 °C 保温 200 min 热处理。将荧光陶瓷的光出射面固定为 W40 碳化硼抛光处理的面,则荧光陶瓷样品的光出射面的粗糙度固定为 850 nm,而荧光陶瓷样品的蓝光入射面的粗糙度在 57~850 nm 区间内变化。图 7 为蓝光入射面粗糙度对荧光陶瓷发光性能的影响。S1-40(入射面  $R_a=57$  nm)、S2-40(入射面  $R_a=76$  nm)与 S4-40(入射

面  $R_a=210$  nm)的色温接近,它们的发光效率也无明显差异。说明单一入射面粗糙度并不是影响荧光陶瓷发光性能的主要因素。

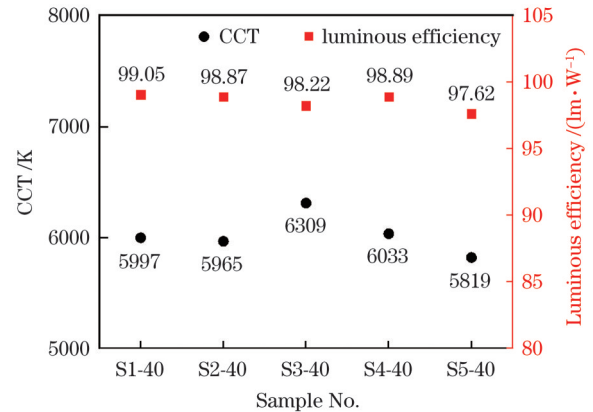


图 7 入射面粗糙度对荧光陶瓷发光性能的影响

Fig. 7 Effect of roughness of light incident surface on luminescent performance of phosphor ceramics

调转 S1-40 样品的入射面与出光面,即以粗糙度为 57 nm 的面作为出光面,以粗糙度为 850 nm 的面作为入射面,则同一荧光陶瓷样品的编号更改为 S40-1。光出射面粗糙度对荧光陶瓷发光性能的影响如图 8 所示。蓝光入射面的粗糙度均为 850 nm,蓝光入射到荧光陶瓷内部,荧光陶瓷的厚度一致且成分相同,因此荧光陶瓷样品的差别仅为光出射面的粗糙度。对比 S40-1(出光面  $R_a=57$  nm)、S40-2(出光面  $R_a=76$  nm)与 S40-3(出光面  $R_a=210$  nm),三个样品的色温接近,它们的发光效率也无明显差异。说明单一的光出射面粗糙度亦不是影响荧光陶瓷发光性能的主要因素。

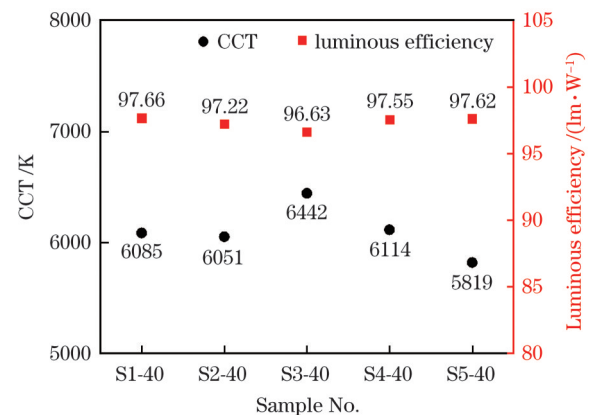


图 8 光出射面粗糙度对荧光陶瓷发光性能的影响

Fig. 8 Effect of roughness of light emitting surface on luminescent performance of phosphor ceramics

S1-40 与 S40-1 为同一块荧光陶瓷, S1-40 的色温为 5997 K 而 S40-1 的色温为 6085 K,对比图 7 与图 8 的数据可知,对于同一块荧光陶瓷,若以粗糙度大的面作为光出射面、以粗糙度小的面作为光入射面,其色温较低且发光效率较高,该结果与郑哲涵等<sup>[14]</sup>的研究结果

较为一致。色温改变说明荧光陶瓷出射的黄绿荧光与蓝光的强度比发生变化,色温低则表明黄绿荧光的含量增加。原因可从三个方面分析:第一,入射面的粗糙度对蓝光入射荧光陶瓷的影响;第二,荧光陶瓷内部的蓝光转换为黄绿荧光的量子效率;第三,光出射面的表面粗糙度对未被吸收与转换的蓝光和黄绿荧光出射的影响。由于采用的荧光陶瓷均为同一块且不同表面粗糙度荧光陶瓷的量子效率波动较小(图 6),故荧光陶瓷内部蓝光转换为黄绿荧光的量子效率不是主要原因。同时图 7 与图 8 的数据结果表明,单一的光入射面或光出射面的粗糙度均不是影响荧光陶瓷发光性能的主要因素。因此,对于同一块荧光陶瓷,放置方式不同,其发光性能不同:以粗糙度小的面作为光入射面有利于蓝光入射,以粗糙度大的面作为光出射面有利于光线的出射,且荧光陶瓷的发光性能是其自身量子效率与光入/出射面的表面状态协同作用的结果。

## 4 结 论

荧光陶瓷表面粗糙度对其发光性能有明显影响。表面粗糙度的增加可降低荧光陶瓷的色温,提高其发光效率。通过改变入射面与出射面的粗糙度,研究了表面粗糙度对发光性能的影响,然而荧光陶瓷的发光性能均无明显变化,说明单一入射面或出射面的粗糙度改变均不是荧光陶瓷发光性能改变的主要原因。针对同一荧光陶瓷样品(入射面与出射面的粗糙度有差异),以粗糙度大的面作为出光面、以粗糙度小的面作为入射面,其色温更低且发光效率略高,说明以粗糙度小的面作为光入射面有利于蓝光入射,以粗糙度大的面作为光出射面有利于光线的出射。研究结果为复合相荧光陶瓷的应用和加工提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] 唐燕如, 赵帝, 易学专, 等. 电流与温度对蓝光 LED 和白光 LED 发光性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2103003.  
Tang Y R, Zhao D, Yi X Z, et al. Current and temperature effects on luminescence properties of blue and white LEDs[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2103003.
- [2] 王雁斌, 黄新友. 用于大功率 LED/LD 的 YAG:Ce 荧光陶瓷在固态照明的研究进展[J]. 中国陶瓷, 2021, 57(12): 1-9.  
Wang Y B, Huang X Y. Research progress of YAG:Ce fluorescent ceramics for high power LED/LD in solid-state lighting [J]. China Ceramics, 2021, 57(12): 1-9.
- [3] He M T, Jia J N, Zhao J J, et al. Glass-ceramic phosphors for solid state lighting: a review[J]. Ceramics International, 2021, 47 (3): 2963-2980.
- [4] Hong M D, Chen C, Wang H P, et al. Improved optical properties of phosphors-in-glass through the optimal size distribution of glass powder[J]. Dalton Transactions, 2023, 52(21): 7271-7278.
- [5] 侯海兰, 刘传龙, 刘方焜, 等. 蓝宝石基光色可调荧光玻璃陶瓷的发光性能[J]. 中国激光, 2023, 50(10): 1003001.  
Hou H L, Liu C L, Liu F S, et al. Luminescence properties of sapphire-based color-tunable glass ceramic phosphors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(10): 1003001.
- [6] Liu Y, Zhang M F, Wu D, et al. Microstructures and mechanical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  eutectics with different  $\text{Ce}^{3+}$  concentrations grown by HDS method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 816: 152515.
- [7] He C J, Sai Q L, Xia C T, et al. Influence of Ce ion concentration on fluorescence properties of Ce:TAG- $\text{Al}_2\text{O}_3$  eutectic mixed crystals[J]. Crystal Research and Technology, 2017, 52(7): 1700056.
- [8] Yao Q, Hu P, Sun P, et al. YAG:Ce<sup>3+</sup> transparent ceramic phosphors brighten the next-generation laser-driven lighting[J]. Advanced Materials, 2020, 32(19): 1907888.
- [9] Kwon S B, Yoo J H, Choi S H, et al. Preparation of high-quality YAG:Ce<sup>3+</sup> ceramic phosphor by high-frequency induction heated press sintering methods[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 20477.
- [10] Tang Y R, Zhou S M, Chen C, et al. Composite phase ceramic phosphor of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ce:YAG for high efficiency light emitting[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 17923-17928.
- [11] 邵秀晨, 周圣明, 唐燕如, 等. Ce:YAG 荧光陶瓷掺杂 Gd 对白光 LED 发光性能的影响[J]. 无机材料学报, 2018, 33(10): 1119-1123.  
Shao X C, Zhou S M, Tang Y R, et al. Luminescence characteristics of Ce:YAG ceramic phosphors with Gd<sup>3+</sup> doping for white light-emitting diodes[J]. Journal of Inorganic Materials, 2018, 33(10): 1119-1123.
- [12] Tang Y R, Zhou S M, Yi X Z, et al. The characterization of Ce/Pr-doped YAG phosphor ceramic for the white LEDs[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 745: 84-89.
- [13] 申琳, 唐吉龙, 贾慧民, 等. 快速热退火对 InGaAsSb/AlGaAsSb 多量子阱材料发光特性的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0711001.  
Shen L, Tang J L, Jia H M, et al. Effect of rapid thermal annealing on luminescence properties of InGaAsSb/AlGaAsSb multiple quantum wells material[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0711001.
- [14] 郑哲涵, 张翔, 徐小科, 等. 基于 Ce<sup>3+</sup>:YAG 透明陶瓷的大功率 LED 和 LD 照明原型器件的发光性能: 厚度和表面粗糙度的影响[J]. 发光学报, 2020, 41(11): 1411-1420.  
Zheng Z H, Zhang X, Xu X K, et al. Thickness and surface roughness effect on lighting performance of Ce<sup>3+</sup>:YAG transparent ceramics based high power LED and LD lighting prototype devices [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(11): 1411-1420.
- [15] Wagner A, Ratzker B, Kalabukhov S, et al. Enhanced external luminescence quantum efficiency of ceramic phosphors by surface roughening[J]. Journal of Luminescence, 2019, 213: 454-458.

# Effect of Surface Roughness on Luminescence Performance of Phosphor Ceramics

Tang Yanru<sup>1\*</sup>, Jiang Renjie<sup>2</sup>, Yi Xuezhuan<sup>2</sup>, Zhou Shengming<sup>2</sup>, Sun Yan<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, Zhejiang, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>3</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

## Abstract

**Objective** Ce: Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite phosphor ceramics (Ce: YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) exhibit high thermal conductivity, excellent thermal stability, high phosphor conversion efficiency, and high luminescence quenching power. Hence, they are considered as the most suitable candidate for high-power excitation and are widely used in traffic signal displays, street lighting, car lighting, home lighting, stadium lighting, liquid crystal display backlights, and full-color displays. The luminescence mechanism and preparation process of Ce: YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite phosphor ceramics have been extensively studied. However, there is a paucity of studies on the cutting process and packaging technology of phosphor ceramics, which are crucial for the performance of lighting devices comprising blue light emitting diodes/ laser diodes (LEDs/LDs) and phosphor ceramics. Therefore, this study focusses on Ce: YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite phosphor ceramic and systematically examines the effect of thickness and roughness on the luminescent properties of phosphor ceramics.

**Methods** Blue LED chips were used to excite the Ce: YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite phosphor ceramic in transmission mode. Furthermore, the Ce: YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite phosphor ceramic was cut into 13-mm diameter discs with a laser and polished with boron carbide polishing powder. The effect of the annealing treatment on the luminescence performance of the phosphor ceramic and the variation in the luminescence performance of the phosphor ceramics with different thickness and surface roughness values were systematically examined. Furthermore, different surface roughness values for the blue light incident surface and light-emitting surface were formed using different types of boron carbide polishing powder, which were used to explore the mechanism of the influence of surface roughness on luminescence performance. The photoluminescence (PL) spectra and optoelectronic data of the phosphor ceramic were obtained using a high-precision rapid spectroradiometer equipped with an integrating sphere. The results provide valuable reference for the cutting process and packaging technology of phosphor ceramics.

**Results and Discussions** The results show that annealing can significantly improve the luminescence performance of phosphor ceramics owing to the removal of surface impurities. As the thickness of the phosphor ceramics increases, the intensity ratio of transmitted blue light to yellow-green light emitted by the phosphor ceramics decreases, the color temperature decreases, and the luminescence efficiency increases. Increasing the surface roughness of ceramics can significantly improve the luminous efficiencies of phosphor ceramics. However, the roughness of the blue light incident surface or the light-emitting surface alone slightly affects the luminescent performance of Ce: YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite phosphor ceramics. Therefore, the influence of roughness on the luminescence performance emerges from multiple factors, including the roughness of the blue light incident surface and the photoluminescence quantum efficiency of Ce: YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite phosphor ceramics. The test results indicate that the phosphor ceramic sample exhibits the low roughness for the blue light incident surface and high roughness for the light-emitting surface, which is beneficial for reducing the color temperature of the phosphor ceramic and improving its luminous efficiency.

**Conclusions** Thickness and surface roughness can be used to adjust the luminescence performance of phosphor ceramics. Increasing the thickness of the phosphor ceramic results in an increase in the amount of yellow-green light relative to blue light in the PL spectra of the phosphor ceramic, a decrease in the color temperature, and an increase in the luminous efficiency. Inducing surface roughness can significantly improve the performance of high-power white LEDs based on phosphoric ceramics. Furthermore, annealing has a positive effect on the luminescence properties of phosphor ceramics. These results lay a foundation for the development of high-power light devices based on Ce: YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite phosphor ceramics.

**Key words** materials; composite phosphor ceramic; surface roughness; photoelectric conversion efficiency; color temperature; luminescence spectrum