文章编号:1000-7032(2021)10-1619-08

激光照明应用钇铝石榴石荧光玻璃显色性能优化

孟 遥, 邾强强*, 黄敏航, 胡翔宇, 张 宏, 王 乐* (中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江杭州 310018)

摘要: Y₃Al₅O₁₂: Ce³⁺ (YAG: Ce³⁺)荧光玻璃由于光谱中缺少红绿光成分, 难以满足高显色激光照明的应用 需求。本研究工作基于钇铝石榴石结构荧光材料宽光谱、高光效及高稳定的特性, 选用绿色发光 Y₃(Ga, Al)₅O₁₂: Ce³⁺ (YAGG: Ce³⁺)和橙色发光(Y,Gd)₃Al₅O₁₂: Ce³⁺ (GdYAG: Ce³⁺)荧光材料作为荧光玻璃中的荧 光组分, 获得了具有较高显色性能的荧光玻璃材料。详细研究了制备温度、荧光粉和玻璃粉的比例、YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉的比例以及样品厚度对其性能的影响。通过制备工艺及材料组分的优化, YAGG: Ce³⁺/GdYAG: Ce³⁺荧光玻璃样品在蓝色激光激发下的显色指数(*R*_a)可以达到 79.7, 相比 YAG: Ce³⁺荧光玻 璃提升了 13.7% 左右。具有最优 *R*_a 的荧光玻璃样品的发光饱和阈值为 1.63 W/mm², 此时样品的发光效率 可以达到 163.14 lm/W, 可应用于激光照明领域实现白光照明品质的提升。

关 键 词:激光照明; 钇铝石榴石; 荧光玻璃; 高显色 中图分类号: 0482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210166

Yttrium Aluminum Garnet Phosphor-in-glass with Improved Color-rendering for Laser Lighting

MENG Yao, ZHU Qiang-qiang*, HUANG Min-hang, HU Xiang-yu, ZHANG Hong, WANG Le* (College of Optics and Electronic Science and Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China) * Corresponding Authors, E-mail: zhuqiangqiang@cjlu.edu.cn; calla@cjlu.edu.cn

Abstract: Due to the spectrum defect of the red and green light component, the $Y_3Al_5O_{12}$: Ce³⁺ (YAG: Ce³⁺) phosphor-in-glass (PiG) cannot be applied in high-quality laser lighting. Based on the yttrium aluminum garnet luminescent material with wide spectrum, high luminous efficiency and high stability, the green-emitting Y_3 (Ga, Al)₅O₁₂: Ce³⁺ (YAGG: Ce³⁺) and orange-emitting (Y, Gd)₃Al₅O₁₂: Ce³⁺ (GdYAG: Ce³⁺) phosphors were used as raw materials to fabricate PiG, and the PiG sample with improved color-rendering was achieved. The effects of fabrication temperature, phosphor-to-glass ratio, YAGG: Ce³⁺/GdYAG: Ce³⁺ ratio, and the thickness on properties of PiG samples were studied in detail. By optimizing synthetic conditions and PiG components, the color rendering index (R_a) of achieved PiG can reach 79.7, showing 13.7% improvement compared with that of YAG: Ce³⁺ PiG. The luminescence saturation threshold of PiG sample with optimal R_a is 1.63 W/mm², and the luminous efficacy can reach 163.14 lm/W, suggesting a promising application in laser lighting for achieving better lighting effects.

Key words: laser lighting; yttrium aluminum garnet; phosphor-in-glass; high color-rendering

收稿日期: 2021-04-30;修订日期: 2021-05-10

基金项目:浙江省杰出青年基金(LR19F050001);国家自然科学基金(51832005,62075203,51702339);国家重点研发计划(2017YFB0403100, 2017YFB0403105)资助项目

Supported by The Preeminence Youth Science Funds of Zhejiang Province(LR19F050001); National Natural Science Foundation of China(51832005,62075203,51702339); National Key R&D Program of China(2017YFB0403100,2017YFB0403105)

1引言

白光 LED(Light emitting diode, LED)具有发 光效率高、可靠性高、坚固耐用和节能环保等优 势^[14],但是作为激发源的蓝光 LED 芯片在高电 流下会出现发光效率下降的现象,这导致白光 LED 难以满足高功率、高亮度固态照明的应用需 求^[54]。相比于 LED 照明,激光照明技术可以通 过输入电流的增加很容易获得非常高的发光强 度^[74]。因此,激光照明被认为是当前实现高亮 度白光照明的最佳选择,满足激光照明应用需求 的荧光材料也因此成为下一代固态照明技术的研 究重点。

在激光照明技术中,起到光转换作用的荧光 材料决定了器件的发光效率、发光强度、发光稳定 性及显色性等关键参数。相比于白光 LED 照明. 在激光照明技术中,由于受到高功率密度激光的 激发,荧光材料更容易因热量的累积而产生发光 猝灭现象,从而导致最后器件发光性能的劣化,高 功率激光照明也因此对荧光材料的导热性及高温 稳定性提出了更高的要求^[9]。黄色发光 Y₃Al₅O₁,: Ce^{3+} (YAG: Ce³⁺)荧光材料以其宽光谱、高光效、 高稳定的特点,在传统 LED 照明领域应用最为广 泛。为了将 YAG: Ce³⁺荧光材料应用于激光照明 领域,研究人员对单晶荧光材料[10-12]、荧光陶瓷 材料^[13-16]以及荧光玻璃材料^[17-18]进行了研究。 在这些材料中,YAG: Ce³⁺单晶荧光材料和 YAG: Ce³⁺荧光陶瓷材料虽然具有高热导率和优异的 发光稳定性,但材料的制备工艺相对复杂,导致其 生产成本较高,同时也面临着大批量制备困难的 问题。与单晶荧光材料和荧光陶瓷材料相比, YAG: Ce³⁺荧光玻璃材料具有制备工艺简单、成本 低、重复性好、容易大规模生产的特点,在激光照 明领域应用优势明显^[19-21]。例如,张等制备了一 种高外量子效率(60%)的钇铝石榴石(YAG)基 荧光玻璃,并结合蓝光激光器获得了具有110 lm/ W光效的激光照明器件^[22]。但由于 YAG: Ce³⁺ 荧光材料光谱中缺少红绿光成分,YAG: Ce³⁺荧光 玻璃在应用于激光照明器件时显色性能较差,目 前还无法满足高品质激光照明的应用需求。例 如,魏等在蓝宝石基板上制备了一种 YAG: Ce³⁺ 荧光玻璃薄膜材料,样品虽然具有较高发光效率 (211 lm/W),但显色指数(R_{a})只能达到 65^[23]。 在 YAG: Ce³⁺荧光材料中利用 Ga 元素取代部分 Al 元素、Gd 元素取代部分 Y 元素,可以分别实现 荧光材料发光波长的蓝移和红移,从而获得具有 绿色发光的 Y₃(Ga,Al)₅O₁₂: Ce³⁺(YAGG: Ce³⁺)^[16] 及橙色发光的 (Y,Gd)₃Al₅O₁₂: Ce³⁺(GdYAG: Ce³⁺)^[24]荧光材料。因此,如果能利用 YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧光材料作为荧光玻璃中的 荧光组分,则可以有效提升荧光玻璃材料发光光 谱中的红、绿光成分,从而实现激光照明显色性能 的提升。

在本研究工作中,基于钇铝石榴石结构荧光 材料宽光谱、高光效及高稳定的特性,利用绿色发 光 $Y_3(Al,Ga)_5O_{12}$: Ce³⁺(YAGG: Ce³⁺)和橙色发 光(Gd,Y)_3Al₅O_{12}: Ce³⁺(GdYAG: Ce³⁺)荧光材料 作为荧光玻璃中的荧光组分,成功获得了荧光玻 璃材料。本文详细研究了制备温度、荧光粉和玻 璃粉的比例、YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉 的比例以及样品厚度对其发光性能及透过性能的 影响。通过制备工艺的优化,获得的 YAGG: Ce³⁺/GdYAG: Ce³⁺荧光玻璃样品在蓝色激光的 激发下 R_a 可以达到 79.7,相比传统 YAG: Ce³⁺荧 光玻璃提升了 13.7% 左右。具有最优 R_a 的荧光 玻璃样品的发光饱和阈值为 1.63 W/mm²,此时 样品的发光效率可以达到 163.14 lm/W,在高品 质激光照明领域具有潜在应用前景。

2 实 验

2.1 材料选取与荧光玻璃制备

Y₃(Ga, Al)₅O₁₂: Ce³⁺ (YAGG: Ce³⁺, λ_{em} = 525 nm)、(Gd, Y)₃Al₅O₁₂: Ce³⁺ (GdYAG: Ce³⁺, λ_{em} = 580 nm)荧光粉和 K₂O-Na₂O-Al₂O₃-SiO₂ 玻璃粉原料均为商用产品,荧光粉购买于苏州市兰 博光电科技有限公司,玻璃粉的软化温度为 710 ℃。 荧光玻璃制备方法如图 1 所示,将 YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉与玻璃粉在玛瑙研磨钵中研 磨混合,YAGG: Ce³⁺ 和 GdYAG: Ce³⁺ 荧光粉的质 量比为 3:7、4:6、5:5、6:4、7:3,荧光粉和玻璃粉 的质量比(PtG)为 1:2、1:1、2:1、3:1。利用压片 机将混合均匀的荧光粉和玻璃粉压制成直径为 10 nm 的圆片,其中压片机采用的压力为 2.5 MPa,保压时间为 30 s,然后将圆片放入高温制备

炉中,在氮气气氛中于750~900℃的温度下保温 10 min,待自然冷却后,获得最终的荧光玻璃 样品。

为了更好地研究荧光玻璃的显色性能,本研 究还在相同条件下制备了 YAG: Ce³⁺(PtG 比为1:1)





荧光玻璃样品。

2.2 性能表征

采用X射线粉末衍射仪(D2 PHASER XRD) 确定原料粉体及荧光玻璃的物相。荧光玻璃透过 率由双积分球测试系统测量(图 2(a)),光致发 光光谱由荧光分光光度计(F4600)测得。使用荧 光显微镜(BX53M,OLYMPUS)确定原料粉体及 荧光玻璃的微观结构。荧光玻璃的量子效率 (QE)和激光激发性能通过一个定制的荧光测试 系统利用反射模式进行测量(图 2(b))。测试 时,将荧光玻璃样品安装在积分球(美国蓝菲光 学,直径 30 cm)的样品架上,利用蓝光激光器(波 长 450 nm)对样品进行激发,样品上激光的光斑 面积为1.04 mm²,使用激光功率计(OPHIR)来测 量激光功率的数值,采用 CCD 光谱仪(美国海洋 光学 HR4000)对荧光玻璃样品的发光信号进行 采集分析。



图 2 (a) 双积分球测试系统;(b) 激光激发发光测试系统。

Fig. 2 (a) Double-integrating-sphere measurement system. (b) Measurement device for the blue-laser-driven emission.

3 结果与讨论

3.1 原料性能

在荧光玻璃的制备过程中,荧光粉及玻璃粉 原料良好的分散性及微观形貌有利于荧光粉颗粒 在玻璃基质中的均匀分散,从而实现最终荧光玻 璃样品性能的提升。图 3 为原料玻璃粉、荧光粉 的荧光显微镜照片。从图 3(a)中可以看出,本研 究中使用的玻璃粉原料具有良好的颗粒分散性; 从图 3(b)、(c)中可以看出使用的 YAGG: Ce³⁺ 和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉原料颗粒呈规则的球形,也 具有良好的分散性,其中 YAGG: Ce³⁺荧光粉颗粒



图 3 玻璃粉(a)、YAGG: Ce³⁺(b)和 GdYAG: Ce³⁺(c)荧光粉的荧光显微照片。 Fig. 3 Fluorescence microscopic images of glass powder(a), YAGG: Ce³⁺ phosphor(b) and GdYAG: Ce³⁺ phosphor(c).

大小为10 μm 左右,在荧光显微镜下表现为绿色 发光(525 nm),GdYAG: Ce³⁺荧光粉颗粒大小在 15 μm 左右,在荧光显微镜下表现为橙色发光 (580 nm)。

3.2 制备温度

制备温度是影响最终荧光玻璃样品性能的关 键因素,本文对 750,800,850,900 ℃温度下获得 的荧光玻璃样品的发光性能及透过性能进行了研 究。荧光玻璃样品中 YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉的质量比1:1,PtG比1:1,厚度为0.7 mm。图4(a)为不同制备温度荧光玻璃样品的外 量子效率(EQE)测试结果,从图中可以看出,荧 光玻璃样品的发光效率会先随着制备温度的升高 而提升,在制备温度为850 ℃时达到最高,进一步 提高制备温度到900 ℃,荧光玻璃样品发光性能 会出现降低。值得指出的是,由于本研究中使用 氮气气氛来进行荧光玻璃的制备,有效减弱了荧 光粉体在高温制备过程中发光性能的劣化,在 850 ℃空气气氛中制备的荧光玻璃的 EOE 只能 达到63.5%,而相同条件下氮气气氛中制备的荧 光玻璃样品的 EQE 可以达到 72.1%, 与原始粉体 相比仅有少量下降(YAGG: Ce³⁺:73.3%; GdYAG: Ce³⁺:75.9%)。图4(b)为不同制备温度下荧光 玻璃样品的透过性能变化,由于本研究采用双积 分球系统来测量样品的透过率,图4(b)中的透过 率曲线在550 nm 附近会出现荧光玻璃样品的发 光峰。从图 4(b) 中可以看出, 在制备温度达到 800 ℃以上,荧光玻璃样品的透过率可以达到 20% 以上,其中850 ℃获得的样品具有最佳的透 过性能。结合上述荧光玻璃样品量子效率及透过 性能的测试结果可以看出,本研究中荧光玻璃样 品的最佳制备温度为850℃。





为了进一步研究制备温度对荧光玻璃样品性 能的影响,图5给出了不同制备温度荧光玻璃样 品的 XRD 图及发光光谱。从图5(a)中可以看 出,不同温度制备的荧光玻璃样品的 XRD 测试结 果与原始混合荧光粉(YAGG: Ce³⁺/GdYAG: Ce³⁺)相比没有发生改变,这表明高温制备过程并未对原始荧光粉的物相结构产生严重影响。值得指出的是,由于YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧



图 5 原始混合荧光粉以及不同制备温度荧光玻璃样品的 XRD 图谱(a)和发光光谱(b)

Fig. 5 XRD patterns(a) and emission spectra(b) of original phosphor powders and final PiG films

光粉的混合,与 XRD 标准图谱(PDF 73-1370)相比, 荧光玻璃的 XRD 衍射峰表现为两种荧光粉衍射峰 的复合。从图 5(b)中可以看出,与原始混合荧光粉 体相比,不同制备温度下荧光玻璃样品的发光光谱 均未出现明显变化,这也进一步表明了 YAGG: Ce³⁺ 和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉优异的高温稳定性。

3.3 PtG 比

图 6 研究了 PtG 比对荧光玻璃样品发光性能 及透过性能的影响。荧光玻璃样品的制备温度为 850 ℃, YAGG: Ce³⁺ 和 GdYAG: Ce³⁺ 荧光粉的质







3.4 微观结构

图 7 为 850 ℃制备温度下 PtG 比为 1:1的荧光 玻璃样品的荧光显微照片(YAGG: Ce³⁺ 和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉的比例为 1:1)。荧光玻璃样品中并未观 察到明显气孔的存在,表现为半透明致密结构。从 荧光显微图中可以清晰地看到玻璃基质中绿色发光 YAGG: Ce³⁺及橙色发光 GdYAG: Ce³⁺荧光颗粒的存 在,两种荧光颗粒均匀分布于玻璃基质中。通过与 图 3 中原始荧光粉体荧光显微照片对比可以发现,



图 7 850 ℃制备温度下 PtG 比为 1:1的荧光玻璃样品的 表面荧光显微照片

Fig. 7 Surface fluorescence microscopic image of 850 ℃ achieved PiG film with PtG ratio of 1:1

由于 YAGG: Ce³⁺ 和 GdYAG: Ce³⁺ 荧光粉优异的 高温稳定性,原始荧光粉体颗粒可以在玻璃基质 中保持完好的形貌。

3.5 激光激发性能

为了研究荧光玻璃样品在激光激发下的应用 性能,本工作对不同厚度荧光玻璃样品的散热性 能和发光饱和阈值进行了研究。图8(a)为不同 厚度荧光玻璃样品在 0.96 W/mm² 激光激发下的 温度测试结果,样品的温度采用热像仪(TiX580, FLUKE)进行记录。从图中可以看出,由于样品 厚度的增加会导致其散热性能下降,荧光玻璃样 品的中心点温度会随着其厚度的增加而不断升 高。图8(b)为不同厚度荧光玻璃样品的发光饱 和阈值测试结果。从图中可以看出,荧光玻璃样 品的发光饱和阈值会随着其厚度的增加不断下 降,与图8(a)中样品的散热性能的变化一致。对 于厚度为0.7 mm 的荧光玻璃样品,其发光饱和 阈值可以达到 1.63 W/mm²,此时样品的流明效 率为163.14 lm/W。图8(b)中也给出了荧光玻 璃发光性能随时间变化的关系图,从图中可以看 出,在1W的蓝色激光激发下,荧光玻璃可以保



- 图 8 不同厚度荧光玻璃在激光激发下的温度特性和红外热像图(a)及激光激发性能(b)
- Fig. 8 Temperature characteristic and infrared thermal images(a) and luminescence properties(b) of PiG samples with different thickness

持长时间的发光稳定。

3.6 显色性能

本研究工作是通过绿色发光 YAGG: Ce³⁺及 橙色发光 GdYAG: Ce³⁺荧光粉的组合来提高激光 照明的显色性能。图 9 研究了荧光玻璃中 YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉的比例及样品厚度对 其显色性能的影响。通过图 9(a) 可以看出,对于 厚度为 0.7 mm 的荧光玻璃样品,在 YAGG: Ce³⁺ 和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉比例为 1:1时,样品在蓝色 激光激发下具有最佳的显色性能($R_a = 79.7$, CCT = 6 814 K)。而对于 YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧 光粉比例为 1:1的样品,其显色性能在厚度为 0.7 mm



图 9 YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉比例(a)及样品厚度(b)对荧光玻璃显色性能的影响;(c)不同厚度的荧光玻璃样品的 CIE 色坐标及发光照片;(d)本研究获得的荧光玻璃样品与传统 YAG: Ce³⁺荧光玻璃在激光激发下的发光 光谱。

Fig. 9 Effects of YAGG: $Ce^{3+}/GdYAG$: Ce^{3+} ratio(a) and thickness(b) on the R_a of PiG samples. (c) CIE coordinate and images of PiG samples with different thickness. (d) Emission spectra of PiG sample achieved in this work and YAG: Ce^{3+} PiG sample.

时达到最大。通过图 9(c)中的 CIE 色坐标及荧 光玻璃样品发光照片可以更清楚地看出样品厚度 对其发光性能的影响。图9(d)为本研究获得的 荧光玻璃样品在激光激发下的发光光谱,图中也 给出了传统 YAG: Ce³⁺荧光玻璃的发光性能。通 过图 9(d)可以看出,相较于 YAG: Ce³⁺荧光玻璃 ($R_a = 70.1$),利用 YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧 光粉制备的荧光玻璃会表现出更多的红、绿发光 成分,可以实现激光照明显色性能 13.7% 的 提升。

4 结 论

本工作选用绿色发光 YAGG: Ce³⁺ 和橙色发 光 GdYAG: Ce³⁺ 荧光材料作为原料,成功制备了 具有较高显色性能的荧光玻璃。详细研究了制备 温度、荧光粉和玻璃粉的比例、YAGG: Ce³⁺ 和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉的比例以及样品厚度对其发 光性能及透过性能的影响。通过制备工艺的优 化,在制备温度为850 °C、荧光粉和玻璃粉的比为 1:1、YAGG: Ce³⁺和 GdYAG: Ce³⁺荧光粉的比1: 1、厚度为0.7 mm 时,荧光玻璃样品具有最优的 综合性能。YAGG: Ce³⁺/GdYAG: Ce³⁺荧光玻璃 样品在蓝色激光激发下,显色指数(R_a)可以达到 79.7,相比传统YAG: Ce³⁺荧光玻璃提升了13.7% 左右。荧光玻璃样品的发光饱和阈值可以达到 1.63 W/mm²,此时样品的发光效率可以达到 163.14 lm/W,在高品质激光照明领域表现出潜 在的应用前景。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/ CJL.20210166.

参考文 献:

- [1] SCHUBERT E F, KIM J K. Solid-state light sources getting smart [J]. Science, 2005, 308(5726):1274-1278.
- [2] XIE R J, HIROSAKI N. Review: silicon-based oxynitride and nitride phosphors for white LEDs [J]. Sci. Technol. Adv. Mater., 2007,8(7-8):588-600.
- [3] ZHENG H, LUO X B, HU R, et al. Conformal phosphor coating using capillary microchannel for controlling color deviation of phosphor-converted white light-emitting diodes [J]. Opt. Express, 2012, 20(5):5092-5098.
- [4] WANG L, XIE R J, SUEHIRO T, et al. Down-conversion nitride materials for solid state lighting: recent advances and perspectives [J]. Chem. Rev., 2018,118(4):1951-2009.
- [5] PIPREK J. Comparative efficiency analysis of GaN-based light-emitting diodes and laser diodes [J]. Appl. Phys. Lett., 2016,109(2):021104-1-4.
- [6] SHEN Y C, MUELLER G O, WATANABE S, et al. Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence [J]. Appl. Phys. Lett., 2007,91(14):141101-1-3.
- [7] WIERER J J JR, TSAO J Y, SIZOV D S. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting [J]. Laser Photon. Rev., 2013,7(6):963-993.
- [8] 胡盼,丁慧,刘永福,等. YAG: Ce³⁺在激光照明应用中的研究进展 [J]. 发光学报, 2020,41(12):1504-1528.
 HU P, DING H, LIU Y F, *et al.* Recent progress of YAG: Ce³⁺ for white laser diode lighting application [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020,41(12):1504-1528. (in Chinese)
- [9] PENG Y, MOU Y, WANG H, et al. Stable and efficient all-inorganic color converter based on phosphor in tellurite glass for next-generation laser-excited white lighting [J]. J. Eur. Ceram. Soc., 2018,38(16):5525-5532.
- [10] XU J, YANG Y, GUO Z Q, et al. Comparative study of Al₂O₃-YAG: Ce composite ceramic and single crystal YAG: Ce phosphors for high-power laser lighting [J]. Ceram. Int., 2020,46(11):17923-17928.
- [11] XU J, WANG J, GONG Y X, et al. Investigation of an LuAG: Ce translucent ceramic synthesized via spark plasma sintering:towards a facile synthetic route, robust thermal performance, and highpower solid state laser lighting [J]. J. Eur. Ceram. Soc., 2018,38(1):343-347.
- [12] KANG T W, PARK K W, RYU J H, et al. Strong thermal stability of Lu₃Al₅O₁₂: Ce³⁺ single crystal phosphor for laser lighting [J]. J. Lumin., 2017,191:35-39.
- [13] CHEN D Q, XIANG W D, LIANG X J, et al. Advances in transparent glass-ceramic phosphors for white light-emitting

diodes—a review [J]. J. Eur. Ceram. Soc., 2015,35(3):859-869.

- [14] ZHU Q Q, YANG P F, WANG Z Y, et al. Additive-free Y₂O₃: Eu³⁺ red-emitting transparent ceramic with superior thermal conductivity for high-power UV LEDs and UV LDs [J]. J. Eur. Ceram. Soc., 2020,40(6):2426-2431.
- [15] ZHU Q Q,LI S X, YUAN Q, et al. Transparent YAG: Ce ceramic with designed low light scattering for high-power blue LED and LD applications [J]. J. Eur. Ceram. Soc., 2021,41(1):735-740.
- [16] ZHU Q Q, MENG Y, ZHANG H, et al. YAGG: Ce phosphor-in-YAG ceramic: an efficient green color converter suitable for high-power blue laser lighting [J]. ACS Appl. Electr. Mater., 2020,2(8):2644-2650.
- [17] XIANG R, LIANG X J, LI P Z, et al. A thermally stable warm WLED obtained by screen-printing a red phosphor layer on the LuAG: Ce³⁺ PiG substrate [J]. Chem. Eng. J., 2016,306(15):858-865.
- [18] LEE Y K, KIM Y H, HEO J, et al. Control of chromaticity by phosphor in glasses with low temperature sintered silicate glasses for LED applications [J]. Opt. Lett. . , 2014,39(14):4084-4087.
- [19] ZHENG P,LI S X, WANG L, et al. Unique color converter architecture enabling phosphor-in-glass(PiG) films suitable for high-power and high-luminance laser-driven white lighting [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2018, 10(17): 14930-14940.
- [20] KIM E, UNITHRATTIL S, SOHN I S, *et al.* Facile one-step fabrication of 2-layered and 4-quadrant type phosphor-in-glass plates for white LEDs: an insight into angle dependent luminescence [J]. *Opt. Mater. Express*, 2016,6(3):804-814.
- [21] HUANG J, HU X L, SHEN J J, et al. Facile synthesis of a thermally stable Ce³⁺: Y₃Al₅O₁₂ phosphor-in-glass for white LEDs [J]. CrystEngComm, 2015,17(37):7079-7085.
- [22] ZHANG X J, YU J B, WANG J, et al. All-inorganic light convertor based on phosphor-in-glass engineering for next-generation modular high-brightness white LEDs/LDs [J]. ACS Photonics, 2017,4(4):986-995.
- [23] WEI R, WANG L, ZHENG P, et al. On the luminance saturation of phosphor-in-glass (PiG) films for blue-laser-driven white lighting: Effects of the phosphor content and the film thickness [J]. J. Eur. Ceram. Soc., 2019, 39 (5): 1909-1917.
- [24] QIAN X L,SHI M M,YANG B B,et al. Thermostability and reliability properties studies of transparent Ce: GdYAG ceramic by Gd substitution for white LEDs [J]. Opt. Mater., 2019,94:172-181.



孟遥(1996 -),男,安徽安庆人,硕 士研究生,2019 年于黄山学院获得 学士学位,主要从事发光材料的合 成及性能的研究。 E-mail: 2430494539@qq.com



王乐(1981 -),女,河南驻马店人,博 士,教授,硕士研究生导师,2012 年于 浙江大学获得博士学位,主要从事发 光材料与器件、新型照明与显示技术、 光谱分析与测试仪器的研究。 E-mail: calla@ cjlu. edu. cn



邾强强(1988 -),男,安徽芜湖人, 博士,副研究员,2016 年于中国科 学技术大学获得博士学位,主要从 事新型照明显示材料及器件的 研究。

E-mail: zhuqiangqiang@ cjlu. edu. cn