

文章编号: 1000-7032(2021)10-1502-08

AlN-CaAlSiN₃:Eu 红色复相荧光陶瓷的 热等静压后处理及其性能

彭星淋^{1,2}, 李淑星^{3*}, 杜傲宸¹, 程梓秋^{1,2},
姚秀敏^{1,2}, 黄政仁^{1,2}, 解荣军^{3*}, 刘学建^{1,2*}

(1. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049; 3. 厦门大学 材料学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 目前报道的高热导 AlN-CaAlSiN₃:Eu 红色复相荧光陶瓷由于放电等离子体烧结 (SPS) 产生的碳污染问题导致发光性能难以提高。本研究提出了一种减少氮化物荧光陶瓷碳污染的有效方法, 即采用热等静压 (HIP) 在 N₂ 气氛中处理 SPS 烧结的样品。实验表明, 经过 HIP 处理后样品的发光强度和量子效率最高均提高了一倍左右, 光通量提高了 51%, 发光饱和阈值提高了 15% 以上。其中, 性能最佳的样品在入射激光功率高达 15 W 时依然保持完好且未发生发光饱和, 光通量高达 197 lm。本研究利用 HIP 处理制备出具有优异发光性能和极高发光饱和阈值的红色荧光陶瓷, 促进了大功率激光照明领域的发展。

关键词: 激光照明; 氮化物; 荧光陶瓷; 热等静压烧结; 发光饱和

中图分类号: TQ174

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20210146

Hot Isostatic Pressing Post-treatment and Performance of Red-emitting AlN-CaAlSiN₃:Eu Composite Phosphor Ceramics

PENG Xing-lin^{1,2}, LI Shu-xing^{3*}, DU Ao-chen¹, CHENG Zi-qiu^{1,2},
YAO Xiu-min^{1,2}, HUANG Zheng-ren^{1,2}, XIE Rong-jun^{3*}, LIU Xue-jian^{1,2*}

(1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

* Corresponding Authors, E-mail: lishuxing@xmu.edu.cn; rxie@xmu.edu.cn; xjliu@mail.sic.ac.cn

Abstract: The previously reported highly thermal conductive red-emitting AlN-CaAlSiN₃:Eu composite phosphor ceramic is difficult to improve the luminescence performance due to the carbon contamination problem caused by spark plasma sintering (SPS). In this paper, hot isostatic pressing (HIP) post-treatment is used to prepare red-emitting phosphor ceramics with excellent luminescence performance and extremely high saturation threshold, which promotes the development of high-power laser lighting. The SPS sintered samples were treated by HIP in N₂ atmosphere. The experimental results show that the luminescence intensity and quantum efficiency of the samples are doubled after HIP post-treatment, the luminous flux is increased by 51%, and the saturation threshold is increased by more than 15%. The sample with the best performance remains intact without luminance saturation when the incident laser power is as high as 15 W, and the luminous flux is up to 197 lm.

收稿日期: 2021-04-22; 修订日期: 2021-05-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0406700)资助项目

Supported by National Key R&D Program of China(2018YFB0406700)

Key words: laser lighting; nitrides; phosphor ceramics; hot isostatic pressing; luminance saturation

1 引 言

激光二极管(Laser diode, LD)照明相较于发光二极管(Light emitting diode, LED)照明,由于克服了高功率密度下的“效率下降”(Efficiency droop)问题^[1],同时具有亮度高、照射距离远和体积小等优点,目前已经广泛应用于汽车大灯、户外照明、激光电视以及激光影院等许多重要领域^[2-6]。作为激光照明的关键材料,荧光材料的性能直接决定了照明器件的显色指数、流明效率和可靠性等重要技术参数。目前激光照明常用的荧光材料包括荧光陶瓷^[7-8]、荧光玻璃^[9-10]、荧光薄膜^[11-12]、荧光单晶^[13-14]以及量子阱^[15-16]等。其中,荧光陶瓷由于具有优异的光学(量子效率和光提取效率高)、热学(热导率和热稳定性高)性能及微观结构易调控等特点,已经成为目前综合性能最佳且最有应用潜力的激光照明用荧光材料^[2,7]。

目前,激光照明用荧光陶瓷材料主要存在两个问题,一方面在于以 YAG: Ce 黄色荧光陶瓷为代表的石榴石体系荧光陶瓷的光谱中由于缺少红光成分,导致器件的显色指数偏低^[17-19];另一方面在于荧光陶瓷热导率不足限制了大功率激光照明器件发光饱和阈值的提高^[20-21]。为此,在前期的工作中,我们采用放电等离子体烧结(Spark plasma sintering, SPS)成功制备出高热导 AlN-CaAlSiN₃: Eu 红色复相荧光陶瓷,弥补了现阶段红色荧光陶瓷的不足,且热导率达到了目前荧光陶瓷的最高值($53.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$)^[22]。但是,前期的研究工作还存在两个问题:一个是由于氮化物存在扩散系数低、饱和蒸气压高以及高温下容易发生化学反应等固有缺点,导致复相荧光陶瓷难以完全烧结致密,而气孔的存在增加了样品对光线的散射^[23-24];另一个是由于 SPS 烧结需要采用石墨模具、石墨纸以及碳毡,样品不可避免地存在一定程度的碳污染,但不同于氧化物陶瓷可以利用马弗炉进行氧化处理,如何减少氮化物陶瓷样品的碳污染问题成为了一个难题^[24-26]。

为了减少样品气孔和碳污染产生的影响,进一步提高荧光陶瓷的发光性能,本文通过热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)对 SPS 烧结的 AlN-

CaAlSiN₃: Eu 复相荧光陶瓷进行了后处理。HIP 作为一种提高陶瓷致密度的后处理方法广为人知,它通过气体在高温下产生巨大的等静压力,可在较低烧结温度下制备出微观结构均匀、晶粒较细且完全致密的材料^[27]。然而,本实验在气氛选择上巧妙选择通入氮气而非氩气,这除了有利于进一步提高致密化的同时抑制氮化物荧光粉分解外,还产生了减少碳污染的独特效果。实验表明,经过 HIP 处理后,荧光陶瓷的碳污染程度明显降低,样品颜色由暗红色变为鲜红色,样品的发光强度、量子效率、光通量和发光饱和阈值也随之获得显著提高。

2 实 验

2.1 材料制备

本实验先采用 SPS 烧结制备 AlN-CaAlSiN₃: Eu 复相荧光陶瓷,再采用 HIP 对烧结得到的陶瓷样品进行后处理。原料采用 AlN(Grade F, Tokuyama Co., Japan)以及 CaAlSiN₃: Eu²⁺ 荧光粉(Intematix Co., USA),并添加 5% 的 Y₂O₃(Griem Co., China, 99.999%)作为烧结助剂。CaAlSiN₃: Eu²⁺ 荧光粉的添加量为 30%、40% 和 50%,其中荧光粉添加量为 30% 的样品 HIP 处理前后分别标记为 SPS-30% 和 HIP-SPS-30%(其余荧光粉含量的样品的标记依此类推)。首先称取相应质量的 AlN 粉、CaAlSiN₃: Eu²⁺ 荧光粉以及 Y₂O₃ 粉作为原料,采用滚筒球磨混料并把混合好的原料过 200 目筛。SPS 烧结的压力为 30 MPa,烧结温度为 1 700, 1 750, 1 800 °C,保温时间为 5 min。HIP 处理时采用 N₂ 气氛, N₂ 的压力为 150 MPa,烧结温度为 1 750 °C。烧结后的样品经机械加工后再双面抛光到 0.4 mm,为接下来的测试表征做准备。

2.2 性能表征

采用 X 射线衍射仪(XRD, D8 Advance, Bruker, Germany)对样品的物相组成进行了分析。利用一个带有能谱仪(EDS)的场发射扫描电子显微镜(SEM, Magellan 400, FEI, USA)对样品的显微结构、元素分布进行了表征。使用稳态荧光光谱仪(FLS920, Edinburgh Instruments, UK)测量了样品的激发发射光谱。采用量子效率测量系统(QE-2100,

OTSUKA, Japan) 测量了样品的量子效率。通过一个与 CCD 光谱仪(OHSP-350, HOPOOCOLOR, China) 连接的积分球(直径 30 cm) 测量了样品在蓝色激光激发下的发光性能。

3 结果与讨论

图 1 为荧光粉含量为 30%、40% 和 50% (质量比) 的复相荧光陶瓷的 XRD 图谱, 由图 1 可知, 烧结后的复相荧光陶瓷和原料粉体物相组成一致, 说明 CaAlSiN_3 与 AlN 之间没有发生化学反应。图 2(a) ~ (b) 分别为 HIP 处理前后样品的显微结构图, 其中图 2(a) 中标红的区域为样品存在的气孔。由图可知, 样品在 HIP 处理前仍存在少量亚微米级的气孔, 但是经过 HIP 处理后, 这些气孔消失, 样品基本实现了全致密。此外, AlN 晶粒在 HIP 处理后进一步长大, 晶粒尺寸由 $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 长到 $1 \sim 4 \mu\text{m}$ 。由样品的能谱面扫(图 2(c) ~ (h)) 结合 XRD 测试结果(图 1) 可以确

定, SEM 图中粗大的灰色晶粒为 CaAlSiN_3 荧光颗粒, 细小的等轴状晶为 AlN 晶粒, 而图中白色区域为含 Y 的晶界相。

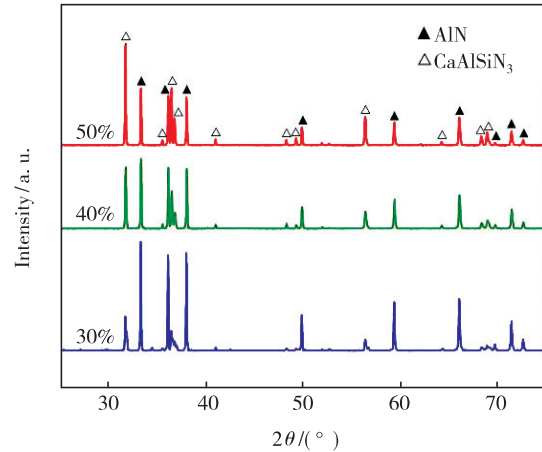


图 1 荧光粉含量为 30%、40% 和 50% 的复相荧光陶瓷的 XRD 图谱。

Fig. 1 XRD patterns of composite phosphor ceramics with 30%, 40% and 50% phosphor content.

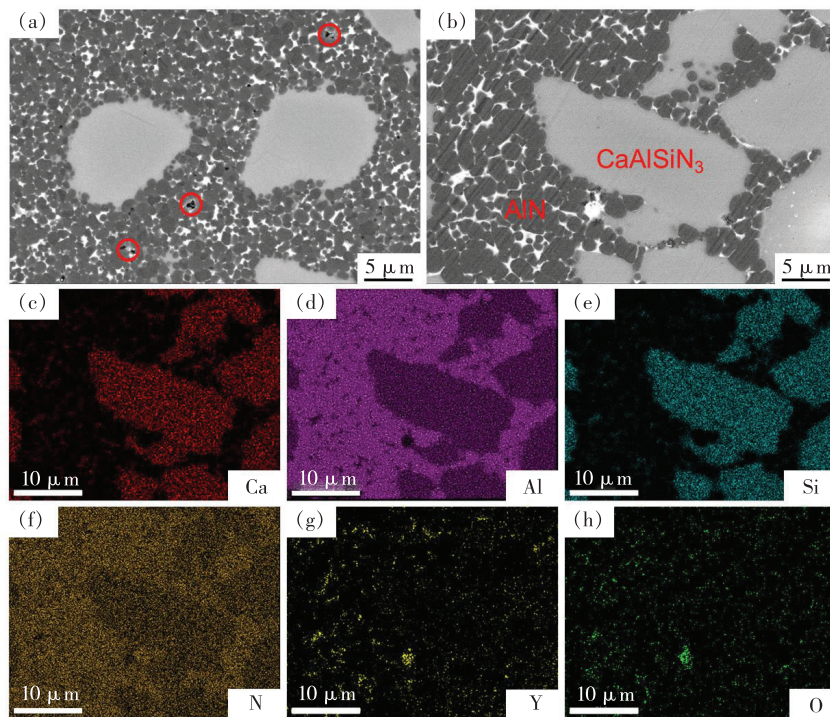


图 2 HIP 处理前(a) 和处理后(b) 样品的 SEM 图以及图(b) 区域对应的 EDS 面扫((c) ~ (h)), 其中图(a) 中标记区域为样品存在的气孔。

Fig. 2 SEM images of the samples before(a) and after(b) HIP treatment and the EDS mapping((c) ~ (h)) corresponding to the area in the Fig. (b). The marked areas in Fig. (a) are the pores in the sample.

图 3(a) ~ (b) 分别为 SPS 1800°C 烧结的不同荧光粉含量的样品 HIP 处理前后的激发发射光谱。显然, 无论 HIP 处理前后, 样品的发光强

度都随荧光粉含量的提高而增大。图 3(c) 是图 3(a) ~ (b) 中相对应样品发射光谱峰值强度的对比图。由图可知, 当样品经过 HIP 处理后, 发光

强度都具有不同程度的提升,其中荧光粉含量为 50% 的荧光陶瓷在 HIP 处理后发光强度提高了近一倍,这主要得益于 HIP 处理后样品碳污染的减少以及气孔率的降低。从图 4 样品的照片可以看出,经过 HIP 处理后,样品的颜色由暗红色转为鲜红色,进一步证实了样品碳含量的降低。据

我们了解,利用热等静压炉在高温高压 N₂ 条件下处理陶瓷样品来减少其碳污染的方法目前还未见报道,其机理有待进一步的探究。我们推测一个可能的原因是:在高温下扩散进入样品基体的少量碳以某种形式挥发出来,而高压 N₂ 气氛主要起着抑制氮化物荧光粉分解的作用。

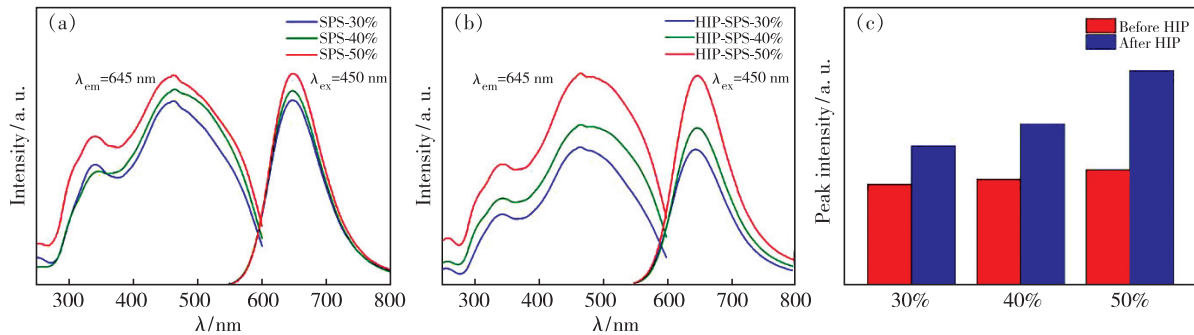


图 3 SPS 1 800 °C 烧结的不同荧光粉含量样品 HIP 处理前(a)和 HIP 处理后(b)的激发发射光谱及相应的峰值强度比较(c)。

Fig. 3 Excitation and emission spectra of samples with different phosphor content sintered at 1 800 °C by SPS before HIP treatment(a) and after HIP treatment(b), and the corresponding peak intensity comparison(c).

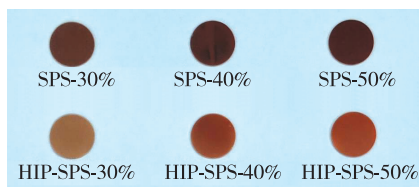


图 4 SPS 1 800 °C 烧结的不同荧光粉含量样品 HIP 处理前后的样品照片

Fig. 4 Photograph of samples with different phosphor content before and after HIP treatment

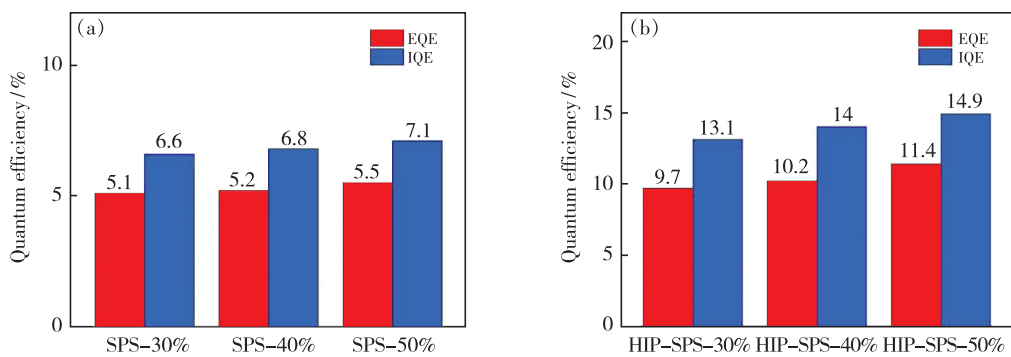


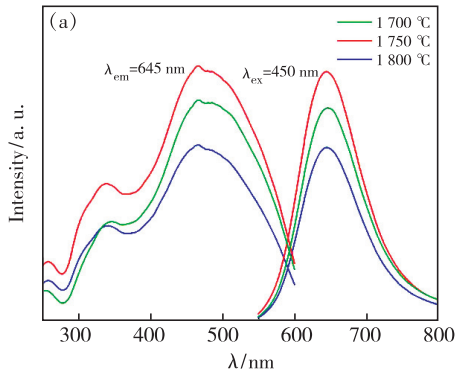
图 5 SPS 1 800 °C 烧结的不同荧光粉含量样品 HIP 处理前(a)和 HIP 处理后(b)的内量子效率和外量子效率

Fig. 5 Internal quantum efficiency(IQE) and external quantum efficiency(EQE) of samples with different phosphor content before HIP treatment(a) and after HIP treatment(b)

图 6(a)是 SPS 不同温度烧结的 40% 荧光粉含量的样品经 HIP 处理后的激发发射光谱。可以看出,经 HIP 处理后,1 700 °C 和 1 750 °C 烧结

的样品的发光强度均高于 1 800 °C 烧结的样品,这可能是由于较低的烧结温度对荧光粉发光中心的破坏较小,同时造成的碳污染也较少。其中

1 750 °C 烧结的样品发光强度相对较高,这可能是由于该样品具有较低气孔率的同时具有较少的碳污染。由图 6(b)可知,上述样品的量子效



率的变化规律和发光强度一致,1 750 °C 烧结的样品量子效率相对较高,EQE 和 IQE 分别为 15% 和 21.3%。

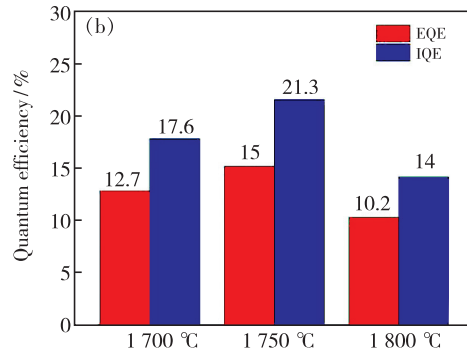


图 6 SPS 不同温度烧结的样品 HIP 处理后的激发发射光谱(a)和内外量子效率(b)

Fig. 6 Excitation and emission spectra(a), IQE and EQE(b) of samples sintered at different temperatures by SPS after HIP treatment.

图 7 是样品在不同入射激光功率激发下的发射光谱,显然,随入射蓝光激光功率的提高,发光强度逐渐增大。图 8 是 SPS 不同温度烧结的 HIP 处理后的样品以及 1 800 °C 烧结未经 HIP 处理的样品的光通量随入射激光功率的变化曲线。对比 1 800 °C 烧结的 HIP 处理前后样品的光通量变化曲线可知,经过 HIP 处理后,荧光陶瓷的光通量由 81 lm 提高到 122 lm,提高了 51%。同时,HIP 处理前的样品在入射激光功率达到 13 W 时即发生发光饱和,但是 HIP 处理后的样品在入射激光功率达到 15 W 时依然保持完好且没有发生发光饱和(此时已经达到激光器功率的上限)。HIP 处理后样品发光饱和阈值的提高和样品的进一步致密化有关,气孔率的减少导致荧光陶瓷的热导

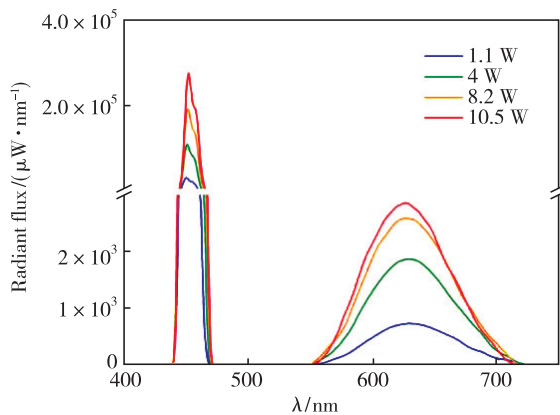


图 7 样品在不同入射激光功率激发下的发射光谱

Fig. 7 Emission spectra of a sample excited by different incident laser powers

率进一步提高;而样品光通量的提高主要是由于 HIP 处理后样品的碳含量减少,量子效率提高。对比 SPS 不同温度烧结的 HIP 处理后样品的光通量变化曲线可知,样品光通量的变化规律和图 6(a) ~ (b) 反映的样品的发光强度和量子效率的规律一致,即 1 750 °C 烧结样品 HIP 处理后光通量最高,1 800 °C 烧结样品 HIP 处理后光通量最低。同时,不同烧结温度的样品经过 HIP 处理后均在入射激光功率高达 15 W 时尚未发生发光饱和。1 750 °C 烧结样品经 HIP 处理后得益于较高的量子效率,其光通量高达 197 lm,这和先前报道

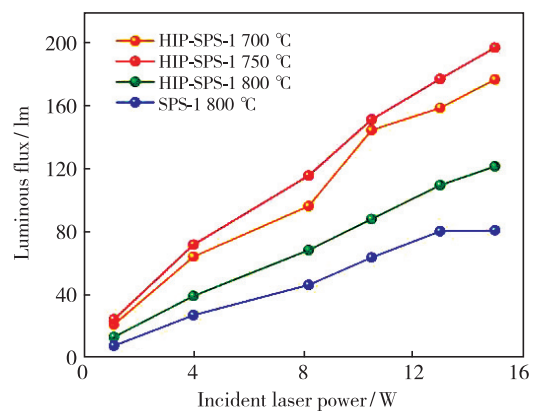


图 8 SPS 不同温度烧结的 HIP 处理后的样品以及 1 800 °C 烧结的未经 HIP 处理的样品的光通量随入射激光功率的变化曲线

Fig. 8 Luminous flux of the samples sintered at different temperatures by SPS after HIP treatment and the samples sintered at 1 800 °C without HIP treatment as a function of incident laser power

的单相 CaAlSiN₃: Eu 荧光陶瓷的光通量相当,但是发光饱和阈值却从 0.5 W 提高到 15 W 以上,这得益于荧光陶瓷热导率的大幅提升^[28]。值得一提的是,本次测量的样品的光通量和发光饱和阈值远高于先前报道的 AlN-CaAlSiN₃: Eu 复相荧光陶瓷的数值^[22]。这一方面是由于 HIP 处理后带来的样品发光性能的提升,另一方面是由于在本次测试时加装了散热风扇,使得在相同激光功率下样品表面的温度降低,样品可以承受更高的激光功率才会发生发光饱和,而入射激光功率的提高必然伴随样品光通量的提高。

4 结 论

本研究工作采用热等静压烧结对 SPS 烧结的 AlN-CaAlSiN₃: Eu 红色复相荧光陶瓷进行了后处理,获得了全致密的荧光陶瓷,减少了样品的碳污

染,有效提高了荧光陶瓷的发光性能。经过 HIP 处理后,样品的发光强度、量子效率、光通量和发光饱和阈值均获得了大幅提升。其中,综合性能最佳的样品的 EQE 和 IQE 分别为 15% 和 21.3%,在入射激光功率高达 15 W 时样品依然保持完好且未发生发光饱和,此时光通量高达 197 lm。这和先前报道的单相 CaAlSiN₃: Eu 荧光陶瓷相比,光通量大致相当,但发光饱和阈值获得了大幅提升(由 0.5 W 提高到 15 W 以上)。该工作将为制备具有优异发光性能的高导热红色荧光陶瓷提供宝贵的经验,为大功率激光照明领域的发展贡献力量。

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.20210146>.

参 考 文 献:

- [1] WIERER JR J J, 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.
- [2] LI S X, WANG L, HIROSAKI N, et al. Color conversion materials for high-brightness laser-driven solid-state lighting [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2018, 12(12): 1800173-1-29.
- [3] KIM Y H, VISWANATH N S M, UNITHRATTIL S, et al. Review-phosphor plates for high-power LED applications: challenges and opportunities toward perfect lighting [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2018, 7(1): R3134-R3147.
- [4] 彭星淋, 李淑星, 刘泽华, 等. 大功率固态照明用荧光陶瓷研究进展 [J]. *无机材料学报*, 2021, 36(8): 807-819. PENG X L, LI S X, LIU Z H, et al. Phosphor ceramics for high-power solid-state lighting [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2021, 36(8): 807-819. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 李江, 李万圆, 刘欣, 等. 固态照明/显示用荧光陶瓷研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(5): 580-604. LI J, LI W Y, LIU X, et al. Research progress on phosphor ceramics for solid-state lighting/display [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(5): 580-604. (in Chinese)
- [7] YAO Q, HU P, SUN P, et al. YAG: Ce³⁺ transparent ceramic phosphors brighten the next-generation laser-driven lighting [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(19): 1907888-1-7.
- [8] ZHENG P, LI S X, WEI R, et al. Unique design strategy for laser-driven color converters enabling superhigh-luminance and high-directionality white light [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2019, 13(10): 1900147-1-10.
- [9] ZHU Q Q, WANG X J, WANG L, et al. β -Sialon: Eu phosphor-in-glass: a robust green color converter for high power blue laser lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3(41): 10761-10766.
- [10] YU J B, SI S C, LIU Y, et al. High-power laser-driven phosphor-in-glass for excellently high conversion efficiency white light generation for special illumination or display backlighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6(30): 8212-8218.
- [11] 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.

- [12] YOU S H, LI S X, ZHENG P, *et al.* A thermally robust $\text{La}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}$: Ce-in-glass film for high-brightness blue-laser-driven solid state lighting [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2019, 13(2):1800216-1-10.
- [13] XU J, THORSETH A, XU C, *et al.* Investigation of laser-induced luminescence saturation in a single-crystal YAG: Ce phosphor; towards unique architecture, high saturation threshold, and high-brightness laser-driven white lighting [J]. *J. Lumin.*, 2019, 212:279-285.
- [14] CANTORE M, PFAFF N, FARRELL R M, *et al.* High luminous flux from single crystal phosphor-converted laser-based white lighting system [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(2):A215-A221.
- [15] SUN Y, ZHOU K, FENG M X, *et al.* Room-temperature continuous-wave electrically pumped InGaN/GaN quantum well blue laser diode directly grown on Si [J]. *Light Sci. Appl.*, 2018, 7(1):13-1-7.
- [16] YANG J, ZHAO D G, JIANG D S, *et al.* Suppression the formation of V-pits in InGaN/GaN multi-quantum well growth and its effect on the performance of GaN based laser diodes [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020, 822:153571.
- [17] LIU X, QIAN X L, HU Z W, *et al.* Al_2O_3 -Ce: Gd YAG composite ceramic phosphors for high-power white light-emitting-diode applications [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2019, 39(6):2149-2154.
- [18] LIU S, SUN P, LIU Y F, *et al.* Warm white light with a high color-rendering index from a single $\text{Gd}_3\text{Al}_4\text{GaO}_{12}$: Ce^{3+} transparent ceramic for high-power LEDs and LDs [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(2):2130-2139.
- [19] LING J R, ZHOU Y F, XU W T, *et al.* Red-emitting YAG: Ce, Mn transparent ceramics for warm WLEDs application [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2020, 9(1):45-54.
- [20] WANG J C, TANG X Y, ZHENG P, *et al.* Thermally self-managing YAG: Ce- Al_2O_3 color converters enabling high-brightness laser-driven solid state lighting in a transmissive configuration [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(13):3901-3908.
- [21] XU Y R, LI S X, ZHENG P, *et al.* A search for extra-high brightness laser-driven color converters by investigating thermally-induced luminance saturation [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(37):11449-11456.
- [22] PENG X L, LI S X, LIU Z H, *et al.* Highly thermal conductive red-emitting AlN-CaAlSiN_3 : Eu^{2+} composite phosphor ceramics for high-power laser-driven lighting [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2021, 41(11):5650-5657.
- [23] ZHANG Y L, HU S, WANG Z J, *et al.* Pore-existing $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$: Ce ceramic phosphor; an efficient green color converter for laser light source [J]. *J. Lumin.*, 2018, 197:331-334.
- [24] LI S X, ZHU Q Q, WANG L, *et al.* CaAlSiN_3 : Eu^{2+} translucent ceramic; a promising robust and efficient red color converter for solid state laser displays and lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4(35):8197-8205.
- [25] MORITA K, KIM B N, YOSHIDA H, *et al.* Distribution of carbon contamination in oxide ceramics occurring during spark-plasma-sintering (SPS) processing; II -effect of SPS and loading temperatures [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2018, 38(6):2596-2604.
- [26] MORITA K, KIM B N, YOSHIDA H, *et al.* Distribution of carbon contamination in MgAl_2O_4 spinel occurring during spark-plasma-sintering (SPS) processing; I -effect of heating rate and post-annealing [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2018, 38(6):2588-2595.
- [27] ZHU Q Q, YANG P F, WANG Z Y, *et al.* Additive-free Y_2O_3 : Eu^{3+} 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.
- [28] LI S X, TANG D M, TIAN Z F, *et al.* New insights into the microstructure of translucent CaAlSiN_3 : Eu^{2+} phosphor ceramics for solid-state laser lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5(5):1042-1051.



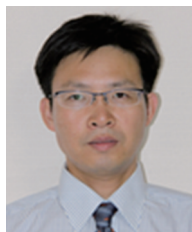
彭星淋(1995 -),男,河南信阳人,博士研究生,2018年于郑州大学获得学士学位,主要从事激光照明用荧光材料的研究。

E-mail: pengxinglin@student.sic.ac.cn



李淑星(1990 -),女,河南平顶山人,博士,讲师,2017年于中国科学院上海硅酸盐研究所获得博士学位,主要从事新型发光材料的研制与器件开发、大功率激光激发下荧光材料的机理研究、设计制备与产业化应用。

E-mail: lishuxing@xmu.edu.cn



解荣军(1969 -),男,江苏镇江人,博士,教授,1998 年于中国科学院上海硅酸盐研究所获得博士学位,主要从事稀土发光材料、量子点及发光器件的研究。

E-mail: rjxie@xmu.edu.cn



刘学建(1970 -),男,河南嵩县人,博士,研究员,博士研究生导师,1999 年于中国科学院上海硅酸盐研究所获得博士学位,主要从事氮化硅、碳化硅等非氧化物先进陶瓷材料的制备科学与工程应用以及先进陶瓷材料的结构-功能一体化的研究。

E-mail: xjliu@mail.sic.ac.cn