

文章编号: 1000-7032(2026)04-0613-08

# 高亮度激光荧光光源用双面蓝宝石基荧光玻璃膜 制备及其光热性能

章宏进<sup>1</sup>, 赵九洲<sup>1</sup>, 余子康<sup>2</sup>, 刘晓伟<sup>1</sup>, 彭 洋<sup>1\*</sup>, 陈明祥<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 航空航天学院, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 开发具备高饱和阈值的颜色转换材料是下一代高亮度激光荧光光源的一项关键挑战。本文通过热压烧结技术, 设计并制备了一种具有双面蓝宝石夹层结构的新型透射式  $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}$  (YAG) 荧光玻璃膜 (PiGF), 即夹层结构 sapphire@PiGF@sapphire (S@PiGF@S)。该结构通过构建高效的双面热传导路径, 并进一步结合旋转实现了动态的、系统级的强化散热, 从而显著提升了对高激光功率密度的耐受能力。实验结果表明, 所制备的 S@PiGF@S 光通量达到  $2\ 761\ lm@16.6\ W\cdot mm^{-2}$ , 相较于传统 PiGF@S 提升了 125.3% ( $1\ 205\ lm@8.5\ W\cdot mm^{-2}$ )。更关键的是, 凭借旋转结构所实现的动态散热机制, 在  $18\ W\cdot mm^{-2}$  的激光功率下, 其最高工作温度仍能保持在  $47\ ^\circ C$ 。本研究结果验证了 S@PiGF@S 能够实现优异的光热综合性能, 在高亮度激光荧光光源的应用中展现出巨大的潜力。

**关键词:** 激光荧光光源; 饱和阈值; 荧光玻璃膜; 光热性能

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250275

CSTR: 32170.14.CJL.20250275

## Fabrication and Photothermal Performances of Double-sided Phosphor-in-glass Film for High-brightness Laser Lighting

ZHANG Hongjin<sup>1</sup>, ZHAO Jiuzhou<sup>1</sup>, YU Zikang<sup>2</sup>, LIU Xiaowei<sup>1</sup>, PENG Yang<sup>1\*</sup>, CHEN Mingxiang<sup>2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

\* Corresponding Author, E-mail: ypeng@hust.edu.cn

**Abstract:** The development of color converters with high luminescence saturation thresholds presents a critical challenge for next-generation high-brightness laser lighting technology. In this work, a novel transmissive  $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}$  (YAG) phosphor-in-glass film (PiGF) featuring a double-sided sapphire sandwich structure (S@PiGF@S) was designed and fabricated *via* thermocompression sintering. This configuration significantly enhances tolerance to high laser power density through efficient dual-side heat dissipation and a “photothermal-decoupling” effect. Experimental results show that the optimized S@PiGF@S color converter achieves a luminous flux of  $2\ 761\ lm$  at  $16.6\ W\cdot mm^{-2}$ , representing a 125.3% improvement over the conventional PiGF@sapphire structure ( $1\ 205\ lm$  at  $8.5\ W\cdot mm^{-2}$ ). More importantly, by incorporating a rotational dynamic cooling mechanism, the core temperature remains as low as  $47\ ^\circ C$  even under a laser power density of  $18\ W\cdot mm^{-2}$ . These findings confirm that the S@PiGF@S converter exhibits outstanding opto-thermal performance, demonstrating great potential for applications in high-brightness laser lighting.

**Keywords:** laser-excited fluorescent light source; saturation threshold; phosphor-in-glass film; photothermal performance

收稿日期: 2025-12-08; 修订日期: 2025-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(52475594); 武汉市重点研发计划(2025050102030007)

Supported by National Natural Science Foundation of China (52475594); Key Research and Development Program of Wuhan City (2025050102030007)

## 1 引 言

白光发光二极管(Light emitting diode, LED)具有发光效率高、可靠性强、结构坚固以及节能环保等优点,然而其作为激发光源的蓝光LED芯片在高电流条件下存在效率衰减问题,制约了白光LED在高功率、高亮度固态照明与显示领域的进一步发展<sup>[1-3]</sup>。相较之下,激光荧光技术能够通过增大输入电流,显著提升发光强度,因而被视为实现高亮度白光光源的理想途径。在此背景下,适用于激光荧光光源系统的荧光材料研究已成为推动下一代固态照明与显示技术发展的关键课题<sup>[4-6]</sup>。

在激光荧光光源中,荧光材料作为光转换功能层,其性能直接决定了器件在发光效率、发光强度、工作稳定性及显色指数等方面的表现<sup>[7-9]</sup>。相较于传统白光LED光源,激光光源所采用的高功率密度激发源易导致荧光体内局部热量积聚,引发发光猝灭效应,进而造成器件光输出性能的衰减。因此,高功率激光荧光技术对荧光材料的导热性能及高温下的稳定性提出了更高要求<sup>[10-13]</sup>。 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ (YAG)黄色荧光材料凭借其发射谱带宽、光效高及稳定性好等优点,已成为LED领域中应用最为广泛的荧光物质之一。为使其适用于激光照明与显示场景,研究界已陆续开发出YAG: $\text{Ce}^{3+}$ 单晶<sup>[14]</sup>、荧光陶瓷<sup>[15]</sup>及荧光玻璃<sup>[16]</sup>等多种形态的荧光材料,并对其在激光激发下的性能展开了系统研究。其中,荧光玻璃(PiG)因其光学性能可调、制备工艺简单及成本较低等显著优势,被视作激光驱动白光照明中一种高性能的颜色转换器<sup>[17-18]</sup>。特别是在采用高导热基板作为热沉构建的荧光玻璃膜复合材料体系中,材料整体的导热与散热性能获得显著提升,从而有效抑制了因热量积聚导致的发光性能衰减问题。厦门大学解荣军团队在发光玻璃陶瓷膜复合材料用于激光照明领域开展了开创性工作<sup>[19]</sup>,率先设计出高性能的荧光玻璃陶瓷膜/蓝宝石基板复合结构,并通过系统研究验证了该类材料在激光荧光光源中的应用潜力。然而,由于蓝宝石材料本身热导率有限,目前商用的荧光玻璃膜(PiG)@蓝宝石荧光转换器在较低激光功率密度( $<15\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ )下仍面临严重的发光饱和问题。目前普遍认为,通过构建有效的传热通道或路径可显著提升PiG转换器的散热能力<sup>[20]</sup>。中国计量大学王乐团队提出了一种

新型PiG复合结构,通过在PiG@蓝宝石基板上方沉积玻璃-氧化铝复合薄膜(AiG)实现散热优化<sup>[21]</sup>。研究结果表明,虽然顶部AiG层能够促进PiG在激光激发过程中的热量传递,但由于该膜层本身热导率不高且透光性较差,最终仅使发光饱和阈值从 $14\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 小幅提升至 $16\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ ,散热效果存在明显局限。本团队将YAG-PiG封装于两片蓝宝石基板之间,构建了PiG双向热传导路径(S@PiG@S),使有效热扩散截面增加一倍,同时最大程度降低了界面热阻<sup>[22]</sup>。但是,在静态激发条件下,由于激光持续辐照,S@PiG@S转换器的被激发区域在10 s后表现出较高的表面工作温度( $284\text{ }^\circ\text{C}$ )。鉴于此,双面散热结构的理论散热潜力未能完全转化为实际效能,客观上限制了PiG@蓝宝石体系在激光照明应用中的发光饱和阈值上限。

基于结构设计创新的思路<sup>[23-26]</sup>,本研究将高速旋转动态散热机制引入双面蓝宝石夹层PiG结构,并系统地比较了静态单面(S@PiG)、静态双面(S@PiG@S)与动态双面(S@PiG@S-T)三种工况下的光热性能,旨在解决静态结构无法克服的局部热积累瓶颈。采用在微量恒定压力下的烧结工艺,通过在蓝宝石基板之间共烧YAG-PiG,成功制备出具有三明治构型的S@PiG@S荧光转换器。实验结果表明,所制备的S@PiG@S转换器在 $16.6\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 激光功率下光通量达到 $2\,761\text{ lm}$ ,较传统S@PiG结构( $1\,205\text{ lm}@8.5\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ )提升125.3%。尤为重要的是,S@PiG@S-T在 $18\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 激光功率密度下工作温度仍稳定维持在 $47\text{ }^\circ\text{C}$ 。本研究证实S@PiG@S结构兼具优异的光学性能与热管理能力,在高亮度激光荧光光源领域具有重要应用价值。

## 2 实 验

### 2.1 材料选取与荧光转换器制备

实验原料YAG: $\text{Ce}^{3+}$ (Intematix, USA,颗粒尺寸 $5\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ )、硅硼酸盐玻璃粉( $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZnO}$ ,玻璃化转变温度为 $580\text{ }^\circ\text{C}$ )均为商用产品。S@PiG@S荧光转换器的制备方法为:首先将YAG荧光粉与玻璃粉按2:3的质量比称量,加入由松节油透醇与乙基纤维素(配比32:1.7,国药集团化学试剂有限公司)组成的有机溶剂体系,充分混合后制得荧光玻璃浆料;随后,将荧光玻璃浆料分别均匀印刷于蓝宝石基板与蓝宝石盖板表面( $15\text{ mm}\times$

15 mm×0.5 mm),并在120 °C下干燥45 min;最终,将覆有荧光玻璃层的蓝宝石盖板与基板进行对位叠合,并在盖板之上放置一个体积为20 mm×20 mm×20 mm的铁块以提供轻微、恒定的压力。随后,将组装体置于烧结炉中,以2 °C·min<sup>-1</sup>的速率从室温升温至680 °C,并在680 °C下保温60 min,最后随炉冷却至室温。通过该过程,成功制得具有双面蓝宝石封装结构、荧光玻璃层厚度为120 μm的S@PiGF@S转换器。

## 2.2 性能表征

采用扫描电子显微镜(SEM, GeminiSEM 350, 德国卡尔蔡司)及配套能谱仪(EDS)对S@PiGF@S转换器的微观形貌与元素分布进行表征。通过荧光光谱仪(QuantaMaster 8500, 加拿大HORIBA)测定样品的激发光谱、发射光谱、荧光衰减曲线及内量子效率。基于自主搭建的光学测试系统表征PiGF转换器在激光激发下的性能表现,系统由蓝光激光器(450 nm, 50 W)、光谱分析仪(HAAS-2000, 中国远方光电)及50 cm积分球构成,可同步获取光通量、发光效率、相关色温、显色指数等参数。激光束经光纤耦合与准直透镜处理后垂直入射样品表面。S@PiGF@S-T样品测试在反射式光路下进行:将样品通过导热胶贴装于高速电机(额定转速:1 000 r·min<sup>-1</sup>)转轴前端的平面铝制夹具上,该夹具兼具机械固定与辅助散热功能。随后,将整个电机模块固定于一个可精密调节高度的三维位移平台(或三脚架)上。通过调节该平台,将样品表面精确调节至与积分球入射洞口中心等高的位置,并确保样品表面与激光束和信号收集光路垂直,激光束从样品平面的左上方入射(即从积分球洞口视角观察,入射方向位于样品表面的左上侧)。该布局旨在最大化信号收集效率,并避免激发光斑过于靠近样品旋转中心,从而充分体现动态散热效果,对应光斑面积约为1 mm<sup>2</sup>。使用热红外成像仪(FLIR E63, 美国菲力尔)监测不同激光功率密度下转换器的表面温度分布。

## 3 结果与讨论

在分析与讨论本实验结果之前,有必要将本研究置于更广阔的技术背景中进行定位。当前,采用蓝宝石作为散热衬底的石榴石型荧光转换器主要发展出三条技术路径,其性能特征各有侧重(如表1对比所示):(1)YAG:Ce<sup>3+</sup>陶瓷厚膜与蓝宝石键合,其优势在于荧光层本身热导率高,但面临

表1 PiGF荧光转换器性能对比

Tab. 1 Performance comparison of PiGF converters

饱和阈值/ W·mm <sup>-2</sup>	最大光通量/ lm	光斑面积/ mm <sup>2</sup>	工作温度/ °C	文献
11.2	1 839	0.785	183.1	[19]
36	3 765	1	60	[20]
16	1 475.9	0.782	76.6	[21]
16	947	0.5	130.8	[27]
18	500	0.5	95.6	[28]
10	275	0.5	未测试	[29]
35.7	5 990	1	74	本文

高温键合工艺复杂、界面光学耦合损耗以及高温下热应力匹配等挑战<sup>[27]</sup>。(2)在蓝宝石上外延生长的YAG:Ce<sup>3+</sup>单晶薄膜具有近乎完美的晶体界面,热阻极低、光学质量高,非常适用于对光束质量要求极高的微区激发,但其制备成本高昂且发光层厚度通常较薄(<10 μm),限制了其总光输出能力<sup>[28]</sup>。(3)荧光玻璃(PiG)与蓝宝石低温共烧,其工艺相对简单、成本较低,荧光粉浓度与玻璃基质可灵活调节以优化光色,是平衡性能与成本的主流方案。然而,其非晶态玻璃基质与晶态蓝宝石之间的界面热阻,以及玻璃在高温下的稳定性,是其应用于更高功率密度的关键制约因素<sup>[29]</sup>。

本研究工作的S@PiGF@S结构即属于第三条路径。与前述研究相比,我们的核心策略并非追求荧光层本身热导率的极致或制备完美单晶界面,而是通过宏观结构设计(双面夹层)与系统级热管理(动态旋转)的创新,来弥补和超越荧光玻璃材料在导热能力上的固有不足,从而在更接近实际应用条件的体系下,探索其性能极限。

### 3.1 样品表征

图1对YAG荧光粉以及制备的S@PiGF@S转换器的发光性能和物相结构进行了研究。图1(a)对YAG荧光粉及其所制备的S@PiGF@S转换器的激发与发射光谱进行了表征与解析:YAG荧光粉在470 nm附近存在一个归属于Ce<sup>3+</sup>离子4f→5d电子跃迁的激发峰。在450 nm光激发下,S@PiGF@S呈现出典型的宽发射带,中心波长约为540 nm。荧光粉与S@PiGF@S之间的PL/PLE光谱(图1(a))及荧光寿命(图1(b))均未出现显著差异,证明S@PiGF@S在烧结过程中成功保持了YAG荧光粉的本征光学特性。如图1(c)所示,YAG荧光粉的IQE从92%下降至81%(S@PiGF@S)。效率损失主要源于两个因素:其一是熔融玻璃制备过程中的热降解效应,其二是PiGF与蓝宝石界

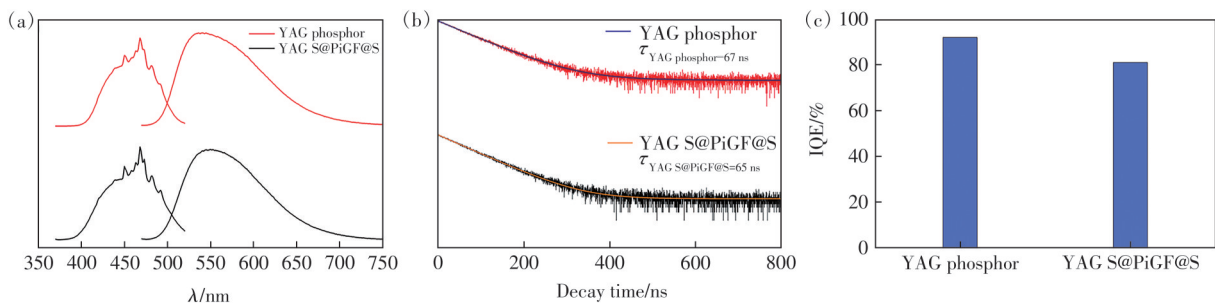


图1 YAG荧光粉和S@PiGF@S的(a)光致发光(PL)与光致发光激发(PLE)谱图、(b)衰减曲线、(c)内量子效率(IQE)  
Fig.1 (a) Photoluminescence (PL) and photoluminescence excitation (PLE) spectra, (b) decay curves, and (c) internal quantum efficiency (IQE) of the YAG phosphor and the PiGF converter

面之间发生的光散射损耗。综上可知,高温制备过程未对S@PiGF@S的发光性能产生严重影响。

为分析S@PiGF@S荧光转换器复合材料的微观结构,本研究采用扫描电子显微镜(SEM)对样品截面进行了表征,结果如图2所示。对截面扫描电镜图像及元素分布的分析表明,荧光玻璃浆料成功涂覆于蓝宝石基板与盖板两侧,并通过热压工艺实现了YAG-PiGF在双面蓝宝石结构之间的同步键合。从微观形貌可见,荧光粉颗粒均匀分布于PiGF表面,未观察到明显气孔。S@PiGF@S由

双面蓝宝石及一层厚度为 $120\ \mu\text{m}$ 的PiGF构成。YAG荧光粉颗粒完整嵌入玻璃基体中,PiGF与蓝宝石上下界面结合致密,无间隙或裂纹产生。这种紧密键合结构有利于降低界面热阻,增强从PiGF到双面蓝宝石介质的热传导。进一步的元素面分布分析结果确认,PiGF中存在Y、Al与Si元素。其中,Y与Al元素集中分布于YAG荧光粉颗粒内部,Si元素主要存在于玻璃基质中。Y与Al元素的分布特征也证实,在S@PiGF@S的烧结过程中,YAG荧光粉保持了完整的晶体结构。

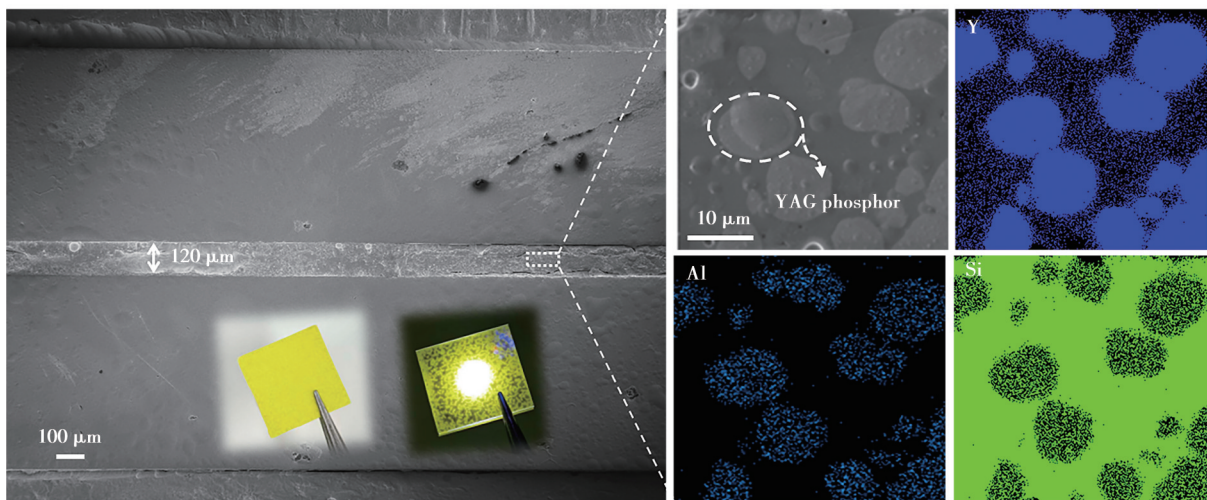


图2 S@PiGF@S的截面SEM图及EDS元素面分布图

Fig.2 Cross-sectional SEM image and EDS mapping images of S@PiGF@S

### 3.2 光学性能

为系统探究蓝宝石衬底在提升PiGF复合材料光学性能中的关键作用,本研究设计了三种不同的荧光玻璃-蓝宝石构型进行激光激发测试。其中,动态旋转式双面蓝宝石封装结构(记为S@PiGF@S-T)由PiGF被夹封于两片蓝宝石板之间构成。作为对比实验组,静态状态下双面蓝宝石衬底支撑PiGF的构型记为S@PiGF@S;另设静态单侧蓝宝石复合结构(记为S@PiGF)作为参照。图3

展示了样品对应的光通量(LF)随激光功率密度的变化关系。可以明显看出,在静态激发条件下,S@PiGF即使在较低的激光功率密度( $8.5\ \text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$ )下也始终会产生严重的发光饱和现象,其最大光通量被限制在 $1\ 205\ \text{lm}$ 。得益于双面蓝宝石所构建的高效热传导通道,S@PiGF@S的饱和阈值相较于S@PiGF提升了 $95.2\%$  ( $16.6\ \text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$ ),其最大光通量也达到了 $2\ 761\ \text{lm}$ 。在旋转激发条件下,S@PiGF@S-T的饱和阈值进一步提升至

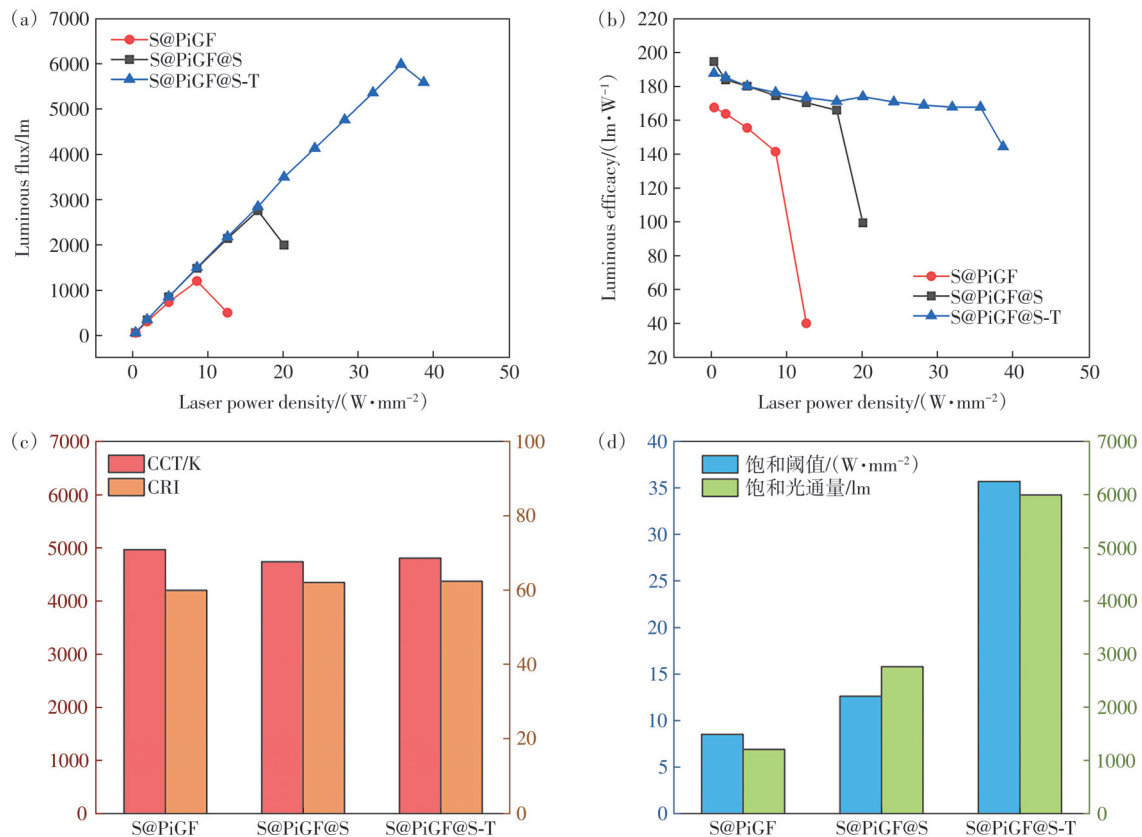


图3 S@PiGF、S@PiGF@S与S@PiGF@S-T在(a)不同激光功率密度下的光通量与(b)光效;三种荧光转换器的(c)激光饱和阈值、最大光通量及(d)饱和阈值激光功率密度下的显色指数和相关色温

Fig.3 Comparison of (a) luminous flux and (b) luminous efficacy versus laser power density for S@PiGF, S@PiGF@S and S@PiGF@S-T. (c) LPD threshold and maximum LF, and (d) CRI and CCT values for three PiGF converters

35.7 W·mm<sup>-2</sup>,同时实现了5 990 lm的最大光通量。此外,旋转模式可将连续激发转换为间歇激发,从而有效延缓热量积累并优化散热路径。在该模式下,S@PiGF@S-T的光效在达到饱和阈值前较为稳定(170~190 lm·W<sup>-2</sup>);而在静态激发条件下,S@PiGF@S与S@PiGF样品的光效随激光功率密度升高均呈现显著衰减趋势。图3(d)展示了三种荧光转换器在饱和阈值下的显色指数(CRI)与相关色温(CCT)。测量结果表明,三组样品的CRI与CCT较为接近,说明上层蓝宝石盖板的引入并未对荧光转换器的光色质量产生明显影响。

### 3.3 热学性能

为评估不同结构的散热性能,我们利用红外热成像仪测量了三种荧光转换器在激光激发过程中的表面温场。图4为制备的单侧蓝宝石S@PiGF(图4(a))与双面夹层蓝宝石S@PiGF@S(图4(b))以及在激光激发下的光学图(图4(c)~(d))。值得注意的是,在12.6 W·mm<sup>-2</sup>的入射激光功率密度下,S@PiGF@S转换器表面形貌与白光发射特性均保持稳定;而传统S@PiGF结构在该条件下

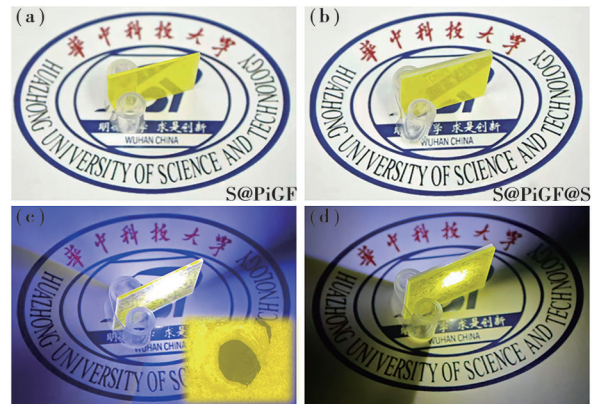


图4 (a)、(c)S@PiGF及其在激光激发下的实物图;(b)、(d)S@PiGF@S及其在激光激发下的实物图

Fig.4 (a),(c)S@PiGF and (b),(d)S@PiGF@S, along with their corresponding optical images under laser excitation

发生了不可逆失效,具体表现为激光作用点发生烧蚀穿孔,并伴随明显的蓝光从孔洞中逸出。

图5对三种结构表面温度在不同激光功率激发下的分布对比分析结果显示,当激光功率密度为18 W·mm<sup>-2</sup>时,S@PiGF与S@PiGF@S的表面温度分别为229 °C与105 °C。该温度值远高于动态

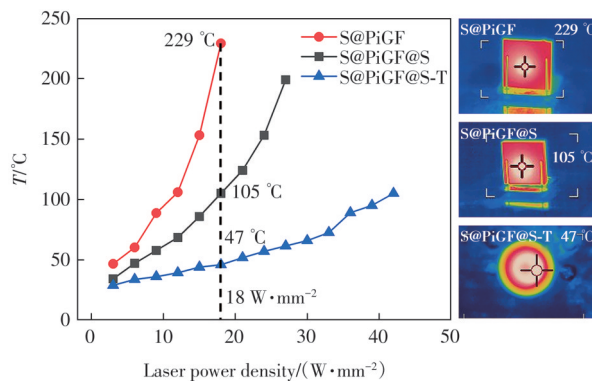


图5 S@PiGF、S@PiGF@S及S@PiGF@S-T在不同激光功率密度下激发10 s后的表面温度变化,以及在 $18 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ 激光功率密度下的红外热成像图

Fig.5 Surface temperatures of S@PiGF, S@PiGF@S and S@PiGF@S-T under 10 s laser excitation at various laser power densities, along with infrared thermal images acquired at  $18 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$

旋转模式所对应的温度( $47 \text{ }^\circ\text{C}$ ),明确表明旋转模式引入的对流散热机制对于降低荧光转换器工作温度至关重要。另外,在动态旋转模式下,即使承受高达 $42 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ 的激光功率密度,S@PiGF@S-T的最高表面温度也仅为 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这一显著温差充分表明,在旋转散热模式下,双蓝宝石夹层结构能够提供更大的有效散热面积。该类结构显著优化了热量从荧光颗粒生成区经玻璃基底、蓝宝石衬底向环境空气的传递路径,从而有效提升了整体

散热效率。

## 4 结 论

针对高亮度激光荧光光源对高饱和阈值颜色转换材料的迫切需求,本研究通过热压烧结技术,成功设计并制备了具有双面蓝宝石夹层结构的新透射式YAG:Ce<sup>3+</sup>荧光玻璃膜(S@PiGF@S)。该结构通过双面蓝宝石构建了高效热传导路径,并创新性地引入旋转机制,实现了动态的强化散热,从而大幅提升了材料对高激光功率密度的耐受性。实验结果表明,所制备的S@PiGF@S在 $16.6 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ 激光激发下,光通量达到 $2761 \text{ lm}$ ,较传统单面蓝宝石结构(S@PiGF,  $1205 \text{ lm}$  @  $8.5 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ )提升约125.3%。更为重要的是,在动态旋转散热模式下,该结构在 $18 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ 的高激光功率下仍能将最高工作温度稳定维持在 $47 \text{ }^\circ\text{C}$ ,展现出卓越的热管理能力。本研究从结构与散热协同设计出发,证实了S@PiGF@S在高激光负载下兼具高光输出与低工作温度的优异综合性能,为下一代高亮度、高稳定性激光荧光光源的开发提供了可行的材料与结构解决方案。

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.20250275>

## 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 ] TSAO J Y, CRAWFORD M H, COLTRIN M E, et al. Toward smart and ultra-efficient solid-state lighting [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2014, 2(9): 809-836.
- [ 3 ] WANG L, WEI R, ZHENG P, et al. Realizing high-brightness and ultra-wide-color-gamut laser-driven backlighting by using laminated phosphor-in-glass (PiG) films [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(5): 1746-1754.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] ZHENG P, LI S X, TAKEDA T, et al. Unraveling the luminescence quenching of phosphors under high-power-density excitation [J]. *Acta Mater.*, 2021, 209: 116813.
- [ 6 ] 孟遥, 郝强强, 黄敏航, 等. 激光照明应用钇铝石榴石荧光玻璃显色性能优化 [J]. *发光学报*, 2021, 42(10): 1619-1626.  
MENG Y, ZHU Q Q, HUANG M H, et al. Yttrium aluminum garnet phosphor-in-glass with improved color-rendering for laser lighting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(10): 1619-1626. (in Chinese)
- [ 7 ] 张瑞, 王伯阳, 王海. 白光LED用Phosphor-in-Glass荧光材料的研究进展 [J]. *无机材料学报*, 2017, 32(4): 337-345.  
ZHANG R, WANG B Y, WANG H. Advances in Phosphor-in-Glass for white LED [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2017, 32(4): 337-345. (in Chinese)

- [ 8 ] XU J, LIU B G, LIU Z W, *et al.* Design of laser-driven SiO<sub>2</sub>-YAG:Ce composite thick film: facile synthesis, robust thermal performance, and application in solid-state laser lighting [J]. *Opt. Mater.*, 2018, 75: 508-512.
- [ 9 ] LIANG G W, YU S D, TANG Y, *et al.* Enhancing luminous efficiency of quantum dot-based chip-on-board light-emitting diodes using polystyrene fiber mats [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2020, 67(10): 4530-4533.
- [ 10 ] 黄新友, 王雁斌, 程梓秋, 等. 高亮度固态照明用LuYAG:Ce荧光陶瓷 [J]. *发光学报*, 2023, 44(6): 964-974.  
HUANG X Y, WANG Y B, CHENG Z Q, *et al.* LuYAG:Ce transparent ceramic phosphors for high-brightness solid-state lighting application [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(6): 964-974. (in English)
- [ 11 ] 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
- [ 12 ] CHEN C, ZHAO D Z, XIONG Z H, *et al.* Comparative study of the photoelectric and thermal performance between traditional and chip-scale packaged white LED [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2021, 68(4): 1710-1716.
- [ 13 ] PENG Y, MOU Y, SUN Q L, *et al.* Facile fabrication of heat-conducting phosphor-in-glass with dual-sapphire plates for laser-driven white lighting [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 790: 744-749.
- [ 14 ] ZHANG Y Q, LIU J M, ZHANG Y J, *et al.* Robust YAG:Ce single crystal for ultra-high efficiency laser lighting [J]. *J. Rare Earths*, 2022, 40(5): 717-724.
- [ 15 ] YAO Q, HU P, SUN P, *et al.* YAG:Ce<sup>3+</sup> transparent ceramic phosphors brighten the next-generation laser-driven lighting [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(19): 1907888.
- [ 16 ] ZHENG F, ZOU J, YANG B B, *et al.* Fabrication and optical properties of laser diodes based on composite phosphors film packaging [J]. *Optik*, 2019, 176: 254-261.
- [ 17 ] 胡盼, 丁慧, 刘永福, 等. YAG:Ce<sup>3+</sup>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:Ce<sup>3+</sup> for white laser diode lighting application [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(12): 1504-1528. (in Chinese)
- [ 18 ] LI S X, ZHU Q Q, TANG D M, *et al.* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-YAG:Ce composite phosphor ceramic: a thermally robust and efficient color converter for solid state laser lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4(37): 8648-8654.
- [ 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 ] KUANG Y H, SUN Y S, CHEN W B, *et al.* Integrating high efficiency and thermal reliability photoluminescence in double-sapphire-sandwiched phosphor-in-glass film for laser projection displays [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2026, 36(12): e20133.
- [ 21 ] WANG G J, ZHU Q Q, NIE S J, *et al.* Innovative architecture for phosphor-in-glass films enabling superior luminance and color quality laser-driven white light [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(6): 2301263.
- [ 22 ] ZHANG H J, ZHAO J Z, YU Z K, *et al.* A novel sapphire@PiGF@sapphire color converter with high luminescence saturation threshold for laser lighting [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(4): 2414023.
- [ 23 ] 司帅晨, 黄霖, 王静. K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>:Mn<sup>4+</sup>荧光玻璃陶瓷及其在激光照明中的应用 [J]. *发光学报*, 2021, 42(10): 1549-1558.  
SI S C, HUANG L, WANG J. K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>:Mn<sup>4+</sup> luminescent glass ceramics applicable to laser lighting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(10): 1549-1558. (in Chinese)
- [ 24 ] 徐涛, 郝强强, 王国娟, 等. 激光照明应用MgO-La<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>N<sub>11</sub>:Ce<sup>3+</sup>复合荧光玻璃的制备及性能优化 [J]. *发光学报*, 2024, 45(7): 1123-1133.  
XU T, ZHU Q Q, WANG G J, *et al.* Fabrication and performance optimization of MgO-La<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>N<sub>11</sub>:Ce<sup>3+</sup> composite phosphor-in-glass for laser lighting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(7): 1123-1133. (in Chinese)
- [ 25 ] 郑鹏, 丁国真, 解荣军. Ce<sup>3+</sup>和Eu<sup>2+</sup>掺杂荧光材料的光猝灭机理研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(10): 1447-1457.  
ZHENG P, DING G Z, XIE R J. Research progress on optical quenching of Ce<sup>3+</sup>- and Eu<sup>2+</sup>-doped luminescent materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(10): 1447-1457. (in Chinese)
- [ 26 ] 张稀雯, 余子康, 牟运, 等. 荧光玻璃封装芯片级白光LED光热性能 [J]. *发光学报*, 2021, 42(12): 1961-1968.  
ZHANG X W, YU Z K, MOU Y, *et al.* Photothermal performance of phosphor-in-glass packaged chip-scale white LED [J].

*Chin. J. Lumin.* , 2021, 42(12): 1961-1968. (in Chinese)

- [ 27 ] LIU S H, XUE B G, ZHOU L M, *et al.* Tailoring thermal behavior and luminous performance in LuAG:Ce films *via* thickness control for high-power laser lighting applications [J]. *Rare Met.* , 2024, 43(12): 6537-6548.
- [ 28 ] HU H Y, XUE B G, LIU S H, *et al.* Lowering operating temperatures in high-power laser-excited LuAG:Ce films by improving crystallinity and increasing Ce<sup>3+</sup> content [J]. *J. Adv. Ceram.* , 2025, 14(4): 9221061.
- [ 29 ] ZHANG P Y, ZHANG Y F, XUE B G, *et al.* YAG:Ce films for laser-driven white lighting: annealing temperature and atmosphere-controlled luminescence performances [J]. *J. Alloys Compd.* , 2024, 972: 172826.



章宏进(2000-),男,湖北荆州人,博士研究生,2022年于武汉纺织大学获得学士学位,主要从事无机玻璃封装材料制备和白光LD封装研究。  
E-mail: D202580946@hust.edu.cn



彭洋(1989-),男,安徽六安人,博士,副教授,博士生导师,2017年于华中科技大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体芯片封装技术研究。  
E-mail: ypeng@hust.edu.cn