

文章编号: 1000-7032(2025)10-1819-23

固态照明用复合结构荧光材料研究进展

齐星宇¹, 吴 兰^{1*}, 马跃龙^{1,2*}, 王子栋¹, 赵一墨¹, 闫子阳¹

(1. 河南工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 嵩山实验室, 河南 郑州 450046)

摘要: 蓝光激光/LED驱动的固态照明器件因其高光效、低能耗、长寿命等显著优势,在汽车大灯、军事照明、医疗内窥镜等领域展现出广阔的应用前景。作为激光/LED照明器件的核心转换元件,荧光材料的结构设计(宏观和微观)直接决定器件的光色品质、色度参数及长期服役稳定性。然而,传统结构的荧光材料在高功率密度蓝光激光/LED激发下,普遍面临着热积累严重、光提取效率低、光色光温差等难题,严重制约了照明器件的发展。为此,具有优异光学、热学和物理化学稳定性能的复合结构荧光材料应运而生,成为解决上述问题的关键突破口。本文系统综述了激光/LED照明用复合结构荧光材料的最新研究进展,从宏观(同质/异质复合结构、高导热复合结构、特殊构型设计)到微观(引入介质和微气孔)等多个维度,详细阐述了荧光材料光色品质、散热性能和光提取效率的调控策略。此外,还深入讨论了复合结构荧光材料在发光饱和机理、产热机理、热管理、重吸收和封装模式等方面面临的挑战,并对新型照明技术的未来发展方向进行了展望。

关键词: 荧光材料; 激光照明; 白光LED; 复合结构; 光热性能

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250093

CSTR: 32170.14.CJL.20250093

Research Progress of Composite Structure Phosphor Materials for Solid-state Lighting

QI Xingyu¹, WU Lan^{1*}, MA Yue-long^{1,2*}, WANG Zidong¹, ZHAO Yimo¹, YAN Ziyang¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. SongShan Laboratory, Zhengzhou 450046, China)

* Corresponding Authors, E-mail: wulan@haut.edu.cn; uhgdmyl@haut.edu.cn

Abstract: Solid-state lighting devices driven by blue laser/LED have shown broad application prospects in fields such as automotive headlamps, military lighting, and medical endoscopes, owe to their significant advantages of high luminous efficiency, low energy consumption, and long service life. As the key wavelength conversion materials of laser/LED lighting devices, the structural design of phosphor materials (both macroscopic and microscopic) directly determines the color quality, chromaticity parameters and long-term service stability of the devices. However, conventional phosphor materials generally face serious problems such as severe thermal accumulation, low light extraction efficiency, and chromatic instability under high-power-density blue LD/LED excitation, which seriously restrict the development of lighting devices. For this reason, composite-structure phosphor materials with excellent optical, thermal and physicochemical stability properties have emerged as the key breakthrough to solve the above problems. This review systematically summarizes recent advances in composite-structure phosphor materials for high-powder laser/LED lighting applications. From multiple dimensions such as macroscopic (homogeneous/heterogeneous composite structures, high thermal conductivity composite structures, special configuration designs) to microscopic

收稿日期: 2025-03-25; 修订日期: 2025-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(52302139); 河南省重点研发与推广专项(222102210023, 252102231067); 河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2021BS069); 嵩山实验室预研项目(YYJC072022020)

Supported by National Natural Science Foundation of China(52302139); Key Research and Development and Promotion Project of Henan Province(222102210023, 252102231067); Scientific Research Startup Fund for High-Level Talents at Henan University of Technology(2021BS069); SongShan Laboratory Project(YYJC072022020)

(introduction of media and micro-pores), it elaborates in detail the regulation strategies of the color quality, heat dissipation performance and light extraction efficiency of phosphor materials. Furthermore, the challenges faced by composite-structure phosphor materials in terms of luminescence saturation mechanism, heat generation mechanism and thermal management, reabsorption and packaging mode are deeply discussed, and the future development direction in new lighting technology is prospected.

Key words: phosphor materials; laser lighting; white LED; composite structure; photothermal property

1 引 言

基于半导体技术的新型固态照明器件,因其发光效率高、环境友好、能耗低、使用寿命长等显著优势,已在汽车大灯、军事照明、投影显示和户外照明等领域广泛应用^[1-4]。目前,激光白光照明/发光二极管(Light-emitting diode, LED)白光照明的主流技术方案是蓝光激光二极管(Laser diode, LD)/LED芯片激发铈离子($4f \rightarrow 5d$ 的能级跃迁)掺杂钇铝石榴石($Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$, YAG:Ce)荧光材料产生黄光,再与激发源未被吸收的蓝光混合形成白光^[5]。该方案具有成本低、发光效率高并能极易调控蓝光与黄光的比例产生不同相关色温白光的优势。然而,由于俄歇复合效应,蓝光LED芯片会不可避免地面临“效率下降”的问题,严重限制了其在大功率、高亮度场所的应用^[6-8]。相比之下,蓝光LD能够在 28 kA/cm^2 的超高电流密度下保持稳定的电光转换效率,具有较低的光束发散度和极小的发射光斑,这使其成为照明与显示器件的理想选择,如内窥镜、激光投影仪等。然而,激光照明在超高功率密度运行时,引发的大量热积累和剧烈热冲击对荧光材料提出了新的挑战^[7, 9-10]。

目前,备受关注的荧光材料主要包括荧光玻璃(Phosphor-in-glass, PiG)^[11-12]、荧光薄膜(Phosphor-in-glass films, PiGFs)^[13-14]、荧光单晶(Single-crystal phosphors, SCPs)^[15-16]、荧光陶瓷(Phosphor ceramics, PCs)^[17-18]。其中,荧光玻璃具有光学性能可调、制备工艺简单、成本相对较低等优势而备受青睐,但低的热导率(通常 $<2 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)导致其在蓝光LD激发下极易发生崩裂,严重制约了荧光玻璃在高功率照明中的应用。为了解决这一问题,研究人员将荧光玻璃以薄膜的形式沉积于高导热基底上(例如,蓝宝石、金属Al等),一方面保留了荧光玻璃的原有发光优势,另一方面显著增强了材料的热管理能力和光热稳定性。荧光陶瓷具有

稳定的理化性能、抗热冲击性能、易于机械加工和宏/微观结构设计等优势,成为研究人员关注的重点^[19-21]。因此,荧光薄膜和陶瓷是固态照明潜在的理想光转换材料。

随着荧光转换型激光白光/LED白光照明技术朝着超大功率、超高亮度方向的快速发展,荧光材料的光热性能问题日益凸显。例如,(1)荧光材料青光和红光难以同时覆盖。以YAG:Ce为例,其发射波长范围和发射峰虽可通过晶体场调控实现局部调节,但在单一基质结构中掺杂的发光中心难以实现青光和红光同时覆盖和高效发光。(2)在高功率激发下荧光材料极易出现发光饱和。单一基质结构的荧光材料在高功率密度下因激发态粒子布居饱和和能量传递效率降低而引发非线性发光衰减,从而限制了光通量的最高输出数值。(3)在高温下荧光材料热猝灭效应显著。当荧光材料服役温度超过 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,其量子效率因声子散射增强和缺陷态而急剧下降,同时还将导致光色光温失稳。(4)荧光材料在高温下极易崩裂。在长期高温环境中,荧光材料极易发生碳化、界面热应力开裂和崩裂,导致发光失效^[22-26]。这些问题严重制约了荧光转换型固态照明器件的服役稳定性和高功率发展。基于此,近年来国内外研究人员致力于开发新型复合结构荧光材料,取得了丰富的研究成果,荧光材料的色度参数(相关色温可调范围达 $2\,500 \sim 8\,000 \text{ K}$,显色指数提升至90以上)和热导率得到了极大的提高^[27]。因此,复合结构荧光材料成为固态照明领域的研究热点和发展趋势。

本文针对固态照明用复合结构荧光材料的最新进展,综述了荧光材料在宏观(同/异质复合结构、高导热复合结构、特殊构型设计)和微观(引入介质和微气孔)等方面的调控策略,并分析了材料的热管理、光提取效率和光色光温的研究成果。

2 荧光材料的宏观结构设计

传统单一结构荧光材料存在红光成分缺失和热积累问题,导致其显色性差、色温漂移和热致光衰。国内外研究人员通过引入红光发射的荧光层和高导热材料层,构建了多层复合结构荧光材料。该方案不仅有效弥补了荧光材料红光成分,还大幅提升了材料的散热性能。因此,荧光材料的宏观结构设计逐渐成为研究热点。

2.1 同质结构荧光陶瓷

以 YAG:Ce 为代表的石榴石型荧光陶瓷凭借其卓越的化学稳定性、机械强度和抗热猝灭特性,已成为大功率固态照明器件的核心材料。然而,其固有光谱发射峰集中于~540 nm,光谱中红光成分显著缺失,造成器件的显色指数(<54)难以突破行业标准(Color rendering index, CRI, >80),相关色温(Correlated color temperature, CCT, ≈6 000 K)偏离暖白光舒适区间(2 700~4 500 K)。为了克服这一难题,研究人员提出多层同质结构设计方案,即在 YAG:Ce 荧光陶瓷基体上精准构筑红光发射的陶瓷层,通过多色光子转换与光谱叠加机制,将显色指数提升至 80 以上且相关色温可调控(冷白光-自然白光-暖白光),同时材料拥有高热导率(>10 W/(m·K))和高热稳定性(150 °C 下发光强度衰减<5%)。这种设计为高显色指数、低相关色温器件的开发提供了新型

荧光材料结构形式。

2017 年,中国科学院福建物质结构研究所郭旺等^[28]采用流延成型制备了白光 LED 用复合结构荧光陶瓷。通过上下叠加不同发射光谱的(Ce, Gd):YAG 和(Ce,Pr):YAG 荧光陶瓷,有效拓宽了发射光谱。测试结果表明,显色指数高达 83.5,相关色温在 4 344~6 988 K 之间。2021 年,江苏师范大学 Wei 等^[29]采用流延成型制备了 Ce:YAG/Cr:YAG 多层复合结构透明陶瓷(图 1(a)),其在 800 nm 处的透过率高达 78%。将多层透明陶瓷与 455 nm 蓝光 LED 封装后,器件的显色指数从 26.7 增加到 77.5,但其发光效率从 181.5 lm/W 降低到 10.4 lm/W (电流为 0.7 A)。与此同时,所构建的 LD 器件显色指数和发光效率分别为 78.1 和 130.2 lm/W。2023 年,江苏师范大学 Liu 等^[30]报道了新型条码结构 YAG:Ce/YAG:Ce,Mn 荧光陶瓷,如图 1(b)~(c)所示。厚度为 0.4 mm 的陶瓷在蓝光 LED 和 LD 的激发下分别获得显色指数为 73.5 和 68.9。此外,通过添加红光激光作为额外光源,获得的显色指数为 81.8,相关色温为 5 895 K。2023 年,中国科学院上海硅酸盐研究所李江等^[31]报道了 YAG:Ce/YAG:Cr/YAG:Pr 条形码结构的荧光陶瓷(图 1(d)~(e))。随着复合结构中 YAG:Cr 和 YAG:Pr 比例的增加,样品发射光谱中的红光成分逐渐增加,有效提升了白光 LED 器件的显色性能。各层厚度比例为 6:6:6 时, YAG:Ce/YAG:Cr/YAG:

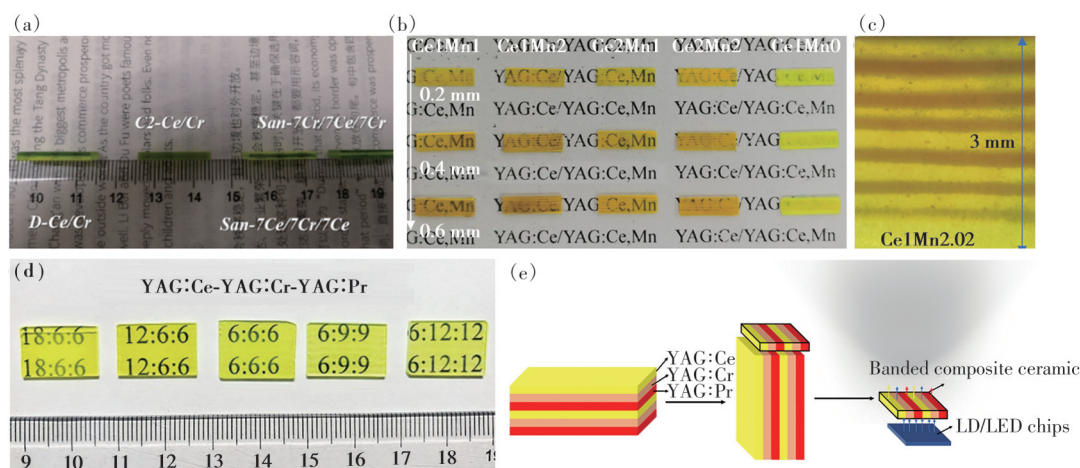


图 1 (a) Ce:YAG/Cr:YAG 复合结构荧光陶瓷实物图; YAG:Ce/YAG:Ce,Mn 复合结构荧光陶瓷实物图(b)和在光学显微镜下的图像(c); (d)不同厚度比的 YAG:Ce/YAG:Cr/YAG:Pr 复合荧光陶瓷实物图; (e)流延成型制备的 YAG:Ce/YAG:Cr/YAG:Pr 陶瓷

Fig.1 (a) Physical image of Ce:YAG/Cr:YAG composite structural ceramics. YAG:Ce/YAG:Ce,Mn composite structure ceramics physical image(b) and image under optical microscope(c). (d)Physical image of YAG:Ce/YAG:Cr/YAG:Pr composite ceramics with different thickness ratios. (e) YAG:Ce/YAG:Cr/YAG:Pr composite phosphor ceramics prepared by tape casting

Pr 荧光陶瓷在 800 nm 处的直线透过率达到 60%。在 454 nm 蓝光 LED 的激发下,获得的发光效率为 106 lm/W, R_g 为 77, R_l 为 86, 相关色温为 7 642 K。

综上所述,多层同质结构荧光陶瓷通过调控各层参数和不同发光中心光谱匹配关系,能够显著提升材料发光光谱中的红光成分,调控光色品质,适用于对显色性和相关色温有较高要求的高功率固态照明器件(如汽车大灯、投影显示等)。该设计突破了单一结构荧光材料斯托克斯位移与热猝灭效应的瓶颈,但该类型荧光陶瓷存在发光均匀性差的问题。此外,在制备过程中需精确调控其各层组分、厚度以及干燥与烧结阶段的材料形变,同时层间界面平整性控制亦是制备过程中的关键问题。

2.2 异质结构荧光材料

随着超高功率密度、超高亮度固态照明技术的不断发展,传统单一结构荧光材料在光谱调控、热耗散和服役稳定性方面的问题日益凸显。为了解决这一问题,国内外研究人员通过复合不同物理形态的荧光材料或者混合不同颜色的荧光粉末等技术手段来提升材料光热性能,取得了丰富的成果。

2.2.1 荧光陶瓷基异质结构

2015 年,韩国国民大学 Park 等^[32]采用纳米波光刻技术在 LuAG:Ce 荧光陶瓷(尺寸为 0.5 cm×0.5 cm,厚度为 0.1 mm)表面构筑了纳米孔状结构 2D SiN_x 光子晶体层,并在其表面巧妙地复合 (Sr,Ca)AlSiN₃:Eu 荧光薄膜,制备了复合结构荧光陶瓷。当薄膜中红粉的质量分数为 7.5% 时,复合结构荧光陶瓷在驱动电流 350 mA 蓝光 LED 激发下,获得的显色指数为 94,相关色温为 4 450 K,发光效率为 71.1 lm/W。2016 年,西门子公司技术研究与技术中心 Pricha 等^[33]针对 CASN:Eu 与 YAG:Ce 陶瓷共烧过程中因收缩行为差异和高温界面反应引发的元素互扩散问题,提出采用氮化硅薄膜作为中间层的解决方案。该方法有效抑制了界面副相生成及元素扩散,使反应区宽度从 9 μm 缩减至 4 μm。2021 年,中国科学院上海硅酸盐研究所李江等^[34]通过在 YAG:Ce 陶瓷基底上逐层沉积青、红光荧光薄膜,构建了三层复合结构荧光材料。当 A 胶、B 胶分别与青粉、红粉质量比为 1:1:0.07 和 1:1:0.01、Ce³⁺ 浓度为 0.01% (原子数分数) 时,所构建的 1.5 W 白光 LED 器件发光效率为

75 lm/W, R_l 为 93, R_g 为 97, 相关色温为 3 852 K。在功率密度为 0.92 W/mm² 的蓝光 LD 的激发下,获得了发光效率为 120 lm/W、显色指数为 90、相关色温为 5 988 K 的白光。然而,荧光薄膜的低热导率 (<2 W/(m·K)) 与陶瓷基底的高热导率 (≈10 W/(m·K)) 形成显著热梯度,导致界面处热阻积累。热量无法通过薄膜快速导出,局部温升引发晶格畸变及氧化性气氛下的 Ce³⁺→Ce⁴⁺ 转化,导致发光效率衰减与膜层烧蚀。2023 年,上海理工大学林辉等^[35]采用真空烧结技术制备了 LuAG:Ce 荧光陶瓷,并在其表面低温共烧结了一层 SrAlSiN₃:Eu²⁺ PiG。通过改变 SrAlSiN₃:Eu²⁺ 荧光粉的掺杂浓度和 LuAG:Ce 荧光陶瓷的厚度,实现了发射光谱的调控。在蓝光 LED 激发下,获得的 R_a 为 86, R_g 为 61。在 1 W 蓝光 LD 激发下,相应的发光效率为 120 lm/W, R_a 为 83, 相关色温为 4 534 K。2023 年,福建师范大学陈大钦课题组^[36]首次将 CASN:Eu PiGF 烧结在 YAG:Ce 透明陶瓷表面,制备了 YAG:Ce PC-CASN:Eu PiGF 复合荧光陶瓷(图 2(a))。对比了透射式和反射式(无蓝宝石)以及透射式(有蓝宝石)封装下,陶瓷发光通量随输入激光功率的变化关系。结果表明,在反射式下,YAG:Ce 陶瓷的色度参数最佳。在驱动功率 18 W 的蓝光 LD 激发下,YAG:Ce TC-CASN:Eu PiGF 复合荧光材料的最大光通量为 3 935 lm,发光效率为 218 lm/W,显色指数为 65.9,相关色温为 4 055 K,如图 2(b) 所示。2023 年,中国科学院福建物质结构研究所周有福等^[37]采用旋涂法在 YAG:Ce 荧光陶瓷上复合了 SCASN 荧光玻璃。将其与 100 W 的蓝光 LED 封装后,获得的发光效率为 115.60 lm/W,显色指数为 73.6,相关色温为 2 750 K。在此基础上,增加一层 YAG 透明陶瓷,利用 YAG 陶瓷的散射作用(图 2(c)~(d)),提升了荧光材料对蓝光 LED 的光吸收率,从而将器件的显色指数提升至 81.7。

2022 年,长春理工大学 Zhou 等^[38]采用真空烧结技术制备了 LuYAG:Ce 荧光陶瓷,并通过丝网印刷结合激光烧结在其表面添加了一层 SrAlSiN₃:Eu²⁺ 荧光粉。在 423 K 温度时,其在 535 nm 和 620 nm 处的发射强度分别保留了室温的 91% 和 94%。将 460 nm 蓝光 LED 与复合荧光陶瓷封装后,在驱动功率为 3.5 W 时,其获得的显色指数为 90,最高发光效率为 148 lm/W。2024 年,中国科学院宁波

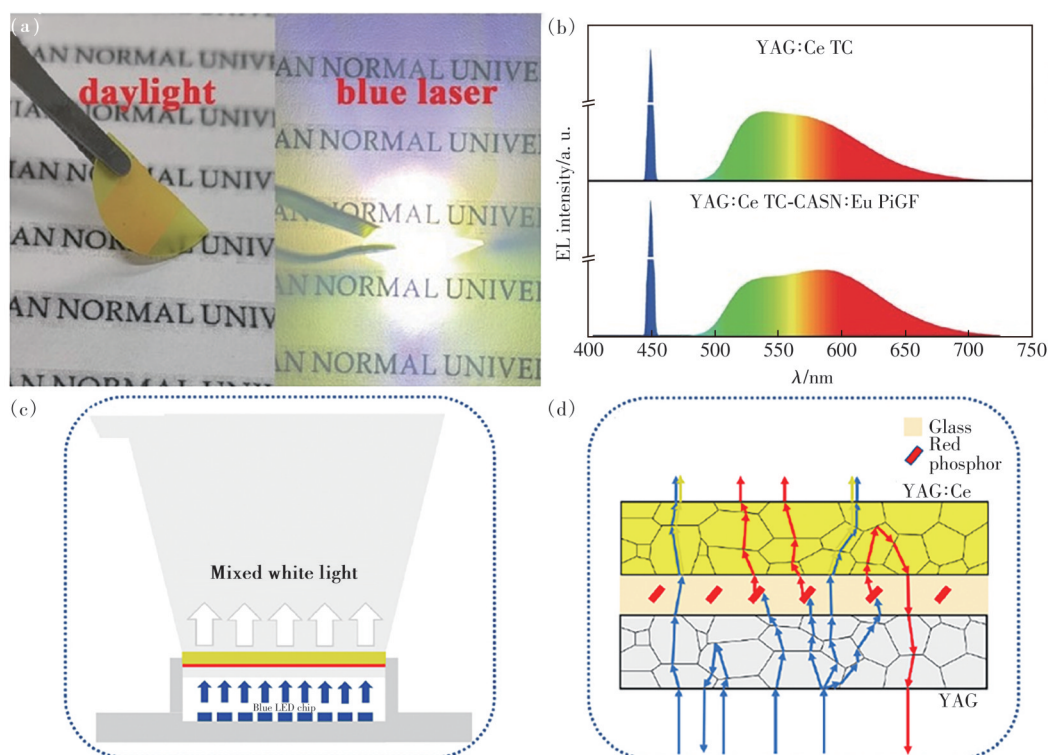


图2 (a)YAG:Ce TC-CASN:Eu PiGF复合荧光陶瓷的实物图和点亮图;(b)YAG:Ce TC和YAG:Ce TC-CASN:Eu PiGF复合荧光陶瓷的EL光谱;(c)基于三明治结构荧光材料的白光LED示意图;(d)三明治结构荧光材料的光传输路径示意图

Fig.2 (a) Physical and lighting pictures of YAG:Ce TC-CASN:Eu PiGF composite ceramics. (b) EL spectra of YAG:Ce TC and YAG:Ce TC-CASN:Eu PiGF composite ceramics. (c) Schematic diagram of a white LED based on sandwich structured phosphor material. (d) Schematic diagram of the light transmission paths of the sandwich structured phosphor material

材料技术与工程研究所 Liu 等^[39]以 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Pb}_2\text{O}_3$ 玻璃粉为基质,通过共烧结 CASN:Eu 荧光玻璃薄膜与 YAG:Ce 荧光陶瓷,制备了 CASN:Eu-YAG:Ce 复合结构荧光材料。CASN:Eu 的宽带红光发射(640 nm)有效补偿了 YAG:Ce 荧光陶瓷红光发射不足的问题,该方案将其发射光谱半高宽拓宽至 154 nm,显色指数从 55 提升至 82。 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Pb}_2\text{O}_3$ 玻璃基质通过匹配热膨胀系数有效降低了界面热应力,其低软化温度特性在共烧结过程中作为无机粘结剂形成致密界面结构,减少光散射损失,使外量子效率(EQE)达 60%~70%。CASN:Eu 自身的高热稳定性与 YAG:Ce 陶瓷的优异热导率协同抑制了非辐射跃迁,使材料在 573 K 下仍能维持 76% 的室温发光强度。在功率密度为 1.3 W/mm^2 蓝光 LD 激发下,获得的发光效率为 168 lm/W ,显色指数为 82,相关色温为 4 450 K。2024 年,江苏师范大学 Zhou 等^[40]报道了 MAS:Eu/YAG:Ce 复合荧光陶瓷。该方案有效减少了光子

重吸收。研究表明,其在 150°C 下仍能保持室温发射强度的 97.8%。将 MAS:Eu/YAG:Ce 复合荧光陶瓷与蓝光 LD 封装后,在功率密度为 47.8 W/mm^2 条件下,获得的显色指数为 76,最大光通量为 484 lm ,发光效率为 103 lm/W 。

综上所述,荧光陶瓷能够作为异质结构荧光体的衬底层,其具有发光功能、热管理和优异的机械强度。该类型复合结构荧光材料在色彩还原要求高的场景具有重要的应用潜力。然而,该异质结构中存在界面热阻(影响导热系数)和润湿性(影响粘结强度)问题,且其制备工艺复杂、成本较高。因此,开发高连接强度的异质界面层和低界面热阻的异质结构荧光体仍面临严峻挑战。

2.2.2 荧光玻璃基异质结构

将红光、绿光荧光玻璃叠加或组合的结构设计形式也是实现高品质发光的一种技术途径。2022 年,福建师范大学 Huang 等^[41]基于图案化结构设计策略,制备了 CASN:Eu PiGF-YAG:Ce

PiG 复合材料。通过调控玻璃基体与荧光材料的热膨胀系数和界面润湿性,使二者界面紧密结合(图 3(a)~(b)),有效避免了光散射和能量损失,并维持 CASN:Eu(量子效率为 66.7%)与 YAG:Ce(量子效率为 94%)的本征发光特性。“荧光轮”旋转激发模式使蓝光激光光束以脉冲形式作用于荧光层,显著增强热对流散热。材料的局部温度被控制在 200 °C 以内并抑制了热猝灭效应,结果表明,在 23 W/mm² 高功率密度下材料突破了 1 000 lm 光通量。通过空间隔离黄/红光区域降低光子交叉和再吸收的图案化设计方案,解决了混合荧光体显色失真问题,显色指数提升至 70,如图 3(c)所示。在此基础上,该团队^[42]进一步优化制备工艺,开发出了图案化 PiGF 一体化复合材料,如图 3(d)所示。通过空间物理隔离双色荧光层研究构思,采用低温共烧结工艺将绿光 LuAG:Ce 与红光 CASN:Eu 荧光层分别集成于蓝宝石基板,消除了传统混合荧光体因光谱交叠引发的光子重吸收效应。图案化设计能够精准调控黄/红光区域的空间分布,优化光谱能量配比。在 19 W/mm² 蓝光激光的驱动下,获得的光通量为 1 408 lm,发光效率为 78 lm/W,显色指数为 82,相关色温 7 625 K,如图 3(e)所示。2023 年,

温州大学向卫东课题组^[43]通过在 SiO₂-B₂O₃-BaO-Na₂O-K₂O 玻璃体系中引入氮化硼(BN),以蓝宝石为衬底,制备了高透过率的三色图案化荧光玻璃薄膜(热导率高达 16.984 W/(m·K))。在 450 nm 蓝光 LD 反射模式激发下(功率密度为 9.32 W/mm²),获得的发光效率为 159.87 lm/W,相关色温为 6 117 K,显色指数为 87.2。2023 年,厦门大学李淑星等^[44]构建了一种应用于内窥镜的 LuAG:Ce PiGF/ CASN:Eu PiGF@Al 荧光材料。在功率密度为 1.22 W/mm² 蓝光激光激发下, LuAG/ CASN@Al 获得了发光效率高达 258 lm/W,显色指数为 91、相关色温为 5 339 K 的高质量白光。2024 年,上海应用技术大学 Zhang 等^[45]以 60TeO₂-30WO₃-10PbO 为基质,制备了 SCASN:Eu 荧光玻璃。研究表明,玻璃保留了原始荧光粉末 93% 的量子效率。将 SCASN:Eu 荧光玻璃与 LuAG:Ce 组合,在驱动电流 20 mA 的蓝光 LED 激发下,获得的最高显色指数为 93.7,发光效率为 80.4 lm/W,相关色温为 5 850 K。2023 年,福建师范大学陈大钦课题组^[46]以 Al₂O₃ 陶瓷为衬底,制备了图案化 CASN:Eu PiGF-YAG:Ce PiGF 复合荧光材料。该复合结构有效地将产生的热声子传输出去,从而减少了

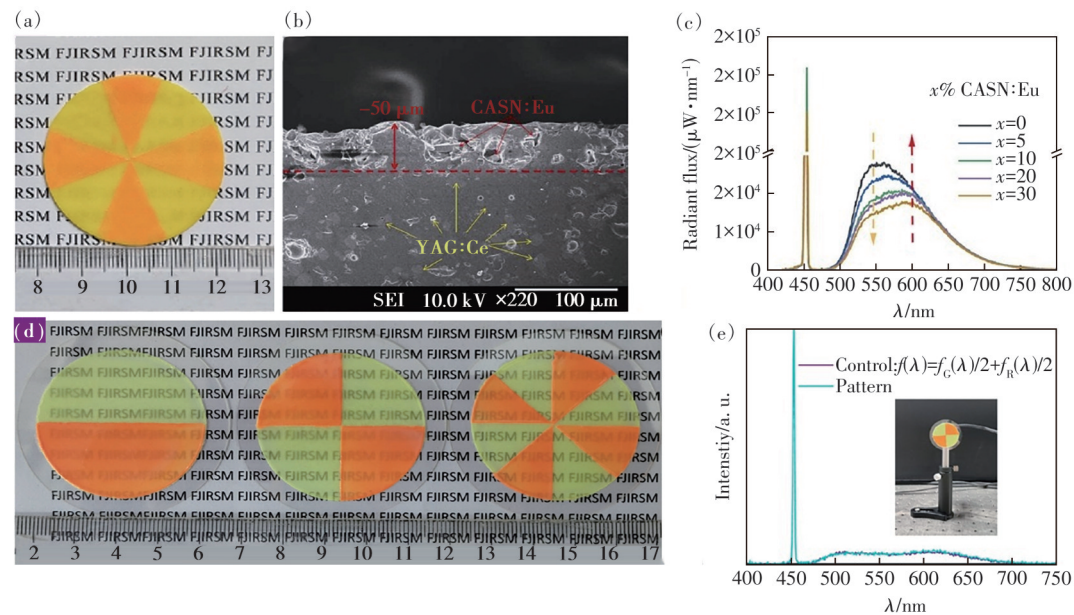


图 3 (a)图案化 CASN:Eu PiGF-on-YAG:Ce PiG 复合荧光材料实物图;(b)CASN:Eu PiGF-on-YAG:Ce PiG 复合荧光材料横截面的 SEM;(c)不同 CASN:Eu 含量的 CASN:Eu PiGF-on-YAG:Ce PiG 复合荧光材料在 12 W/mm² 蓝光激发下的 EL 光谱;CASN:Eu PiGF-LuAG:Ce PiGF-on-sapphire 荧光材料的实物图(d)和发射光谱(e)

Fig.3 (a) Physical pictures of CASN:Eu PiGF-on-YAG:Ce PiG composite phosphor material. (b) SEM of the cross-section of CASN:Eu PiGF-on-YAG:Ce PiG composite phosphor material. (c) EL spectra of CASN:Eu PiGF-on-YAG:Ce PiG composite phosphor with different CASN:Eu contents under 12 W/mm² blue laser excitation. Physical image(d) and EL spectrum(e) of CASN:Eu PiGF-LuAG:Ce PiGF-on-sapphire phosphor material

热电离过程。在激光功率为 43 W 激发下, 获得了光通量为 4 510 lm、发光效率为 105 lm/W、相关色温 3 541 K、显色指数 80.0 的白光发射。2022 年, 华中科技大学彭洋团队^[47]通过在蓝宝石衬底的上、下面烧结 YAGG 和 CASN 荧光玻璃薄膜, 构建了三明治结构 green PiGF-sapphire-red PiGF (G-S-R PiGF)。蓝宝石的物理隔层有效缓解了光子重吸收。在驱动功率为 2.4 W 的蓝光 LD 激发下, 获得了发光效率为 163 lm/W、显色指数为 85.4 的白光发射。

综上所述, 荧光玻璃基异质结构荧光体具有优异的光学性能, 且制备工艺简单、成较低。然而, 在实际应用中荧光玻璃块体本征低的热导率严重限制了其在大功率固态照明领域的应用。异质结构荧光体表面的荧光玻璃薄膜由于异质材料间的热膨胀系数差异, 在激光长时间辐照后, 薄膜极易脱落或出现开裂现象, 从而影响器件的稳定运行。

2.2.3 高导热衬底异质结构

目前, 高显色性和宽光谱的白光实现方案主要有: “蓝光激光+黄色荧光粉+红色荧光粉”或者“蓝光激光+绿色荧光粉+红色荧光粉”。与前者相比, 后者的光谱分布更为均匀且在青光区域具有一定的发射强度, 容易获得高显色指数的白光。例如, 2021 年, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所蒋俊等^[48]以 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Pb}_2\text{O}_3$ 玻璃粉为基质, 将 $\text{CASN:Eu}^{2+}+\text{LuAG:Ce}^{3+}$ 双色荧光玻璃薄膜烧结在 Al_2O_3 陶瓷板上。在 455 nm 蓝光 LD 激发下, 绿粉和红粉质量比为 4:1 的样品获得的光通量为 1 162 lm, 发光效率为 153 lm/W, 显色指数为 88.6。2024 年, 华中科技大学彭洋等^[49]在 AlN 基底上制备了 TiO_2 玻璃薄膜, 随后采用丝网印刷技术制备了红粉/绿粉混合 (M-PiTA) 双色荧光玻璃薄膜。当 TiO_2 玻璃膜厚度为 100 μm 时, M-PiTA 在功率密度为 24.8 W/ mm^2 的蓝光激光激发下, 实现了光通量为 2 053 lm、显色指数为 82.7、色坐标为 (0.337 8, 0.329 7) 的高品质白光发射。2022 年, 安徽大学 Xie 等^[50]以蓝宝石为基底, 采用丝网印刷技术制备了三色荧光玻璃。当绿、黄、红荧光粉质量比为 9:6:1 时, 所构建的白光 LD 器件实现了高品质白光, 光通量为 362.1 lm, 显色指数为 80.3, 相关色温为 4 590 K。2021 年, 华中科技大学彭洋课题组^[51]在蓝宝石基板上印刷了绿、红双色荧光

玻璃薄膜。当双色玻璃薄膜的厚度从 80 μm 增加到 160 μm , 双色 PiGF 的光通量和相关色温逐渐下降。在厚度为 160 μm 时, 白光 LD 器件的显色参数为 $R_a=88$ 、 $R_9=91$ 、 $R_{13}=93$, 相关色温为 4 571 K, 色坐标为 (0.352 5, 0.354 1)。2023 年, 河南理工大学徐坚等^[52]采用丝网印刷技术制备了 LSN:Ce/CASN:Eu 多色混合 PiGF。通过调控 LSN:Ce 与 CASN:Eu 荧光粉的质量比, 实现两者发射光谱的有效叠加 (黄光 528 nm、红光 590 nm), 克服了单一荧光体的光谱限制, 显色指数提升至 80。研究发现, 该方案中光斑扩束率与激光光斑尺寸的线性关系源于光散射-热耗散动态平衡机制, 大尺寸光斑通过降低局部功率密度抑制热猝灭, 同时高导热蓝宝石基底与玻璃基体协同散热维持荧光体高效发光。基于光场限制设计及高热稳定性调控, 该材料获得了 185.9 lm/W 发光效率和 1 302 lm/ mm^2 光出射度。2024 年, 大连工业大学 Ye 等^[53]以 $40\text{SnF}_2\text{-30SnO-30P}_2\text{O}_5$ 玻璃粉为基质, 制备了 $\text{LuYAG:Ce}^{3+}/\text{SCASN:Eu}^{2+}$ 混合双色荧光玻璃。在 365 nm 近紫外光 LED 激发下, 实现了显色指数为 97、 R_t 为 95、 R_g 为 101 的超高显色性光源。

不同发光颜色荧光粉混合的策略在发光效率、热稳定性及光谱调控等方面展现出显著优势。然而, 该类荧光体普遍面临严重的“重吸收”效应, 极易导致亮度和发光效率大幅下降。因此, 开发具有抗重吸收特性的复合结构荧光材料仍面临巨大的挑战。

2.3 高导热复合结构荧光材料

随着固态照明技术朝着超高功率密度、微型化和低成本方向快速发展, 荧光材料体系面临着严峻的热管理挑战。在高功率密度激光激发下, 材料内部的热积累会引发显著的温度猝灭效应 (例如, 在 150 $^{\circ}\text{C}$ 时发光强度衰减超过 50%), 这严重制约了器件的使用寿命和可靠性。为解决这一问题, 研究人员提出了构建高导热复合结构荧光材料的策略。

2.3.1 高导热衬底+荧光陶瓷的复合结构荧光材料

为了提高荧光陶瓷的散热性能和耐受性, 研究人员将高热导率介质与荧光陶瓷复合, 构建出优异光学性能和高效热传导的复合结构荧光材料。例如, 2019 年, 上海理工大学 Yin 等^[54]采用固相反应法制备了 LuAG:Ce^{3+} 透明陶瓷 (热导率为

8.39 W/(m·K))。将厚度为0.8 mm的方形LuAG:Ce³⁺透明陶瓷片放入石墨模具中,加入一定量的Al粉从侧面包围陶瓷后,在400 °C下进行SPS烧结3 min,获得了金属包覆结构的LuAG:Ce³⁺-Al陶瓷,其热导率高达24.07 W/(m·K)。2019年,德国肖特集团Hagemann等^[55]设计了由铝基板和环形YAG:Ce荧光陶瓷组成的旋转荧光轮。由于旋转轮时的间歇激光激发,环形荧光轮展现出较低的工作温度。在入射激光功率为683 W时,获得的光通量高达1.4×10⁵ lm,有效地抑制了荧光陶瓷热猝灭现象。

此外,2022年,美国欧司朗公司Lenef等^[56]开发的Al₂O₃/YAG:Ce复合陶瓷(5 mm×5 mm)在4.3 W激光激发下获得了600 lm光通量(150 lm/W)和500 cd/mm²峰值亮度,验证了该结构在微型化器件中的适用性。2022年,江苏师范大学Sang等^[57]报道了Al₂O₃-YAG:Ce/YAG复合荧光陶瓷,如图4(c)所示。在60 W/mm²泵浦下无饱和现象,获得的光通量为1 000 lm,效率为210 lm/W(CCT=5 471 K)。2023年,南京邮电大学韦玮课题组^[58]提出声子-光子路径分离机制,构建了Al₂O₃-LuAG:Ce交替层状复合荧光陶瓷(尺寸为1 mm×1 mm×

0.3 mm, Al₂O₃层厚为12.5~250.0 μm, LuAG:Ce层厚为62.5~450.0 μm),如图4(a)所示。凭借高热导率的Al₂O₃层形成连续热传导通道,将激光激发的热声子导入Al₂O₃层快速扩散,而LuAG:Ce层通过全内反射效应高效局域激发光子,减少热积累对发光中心的热猝灭效应。该分层结构通过固相反应法精准调控层厚,在微尺度实现Al₂O₃与LuAG:Ce的界面相容性,既保留LuAG:Ce的高量子效率(高达84.1%),又将整体热导率提升至17.1 W/(m·K),显著优于传统复合陶瓷。在27.2 W/mm²蓝光激发下(图4(b)),热声子与光子的解耦传输有效抑制了热致发光衰减,Al₂O₃层的光散射效应延长激发光光程,使绿光转换效率达到220 lm/W,流明密度达5 994 lm/mm²。2024年,福建师范大学陈大钦课题组^[59]开发了Al₂O₃-YAG:Ce@Al(TCC@Al)透明陶瓷(图4(d)~(f)),创新性地Al₂O₃短程导热与Al膜长程导热结合,使热导率推升至29.3 W/(m·K),在450 K时发光强度损失仅8.92%。在20 W/mm²蓝光LD反射模式激发下,未出现发光饱和现象,实现了光通量为4 294 lm、发光效率为215 lm/W的均匀白光发射。

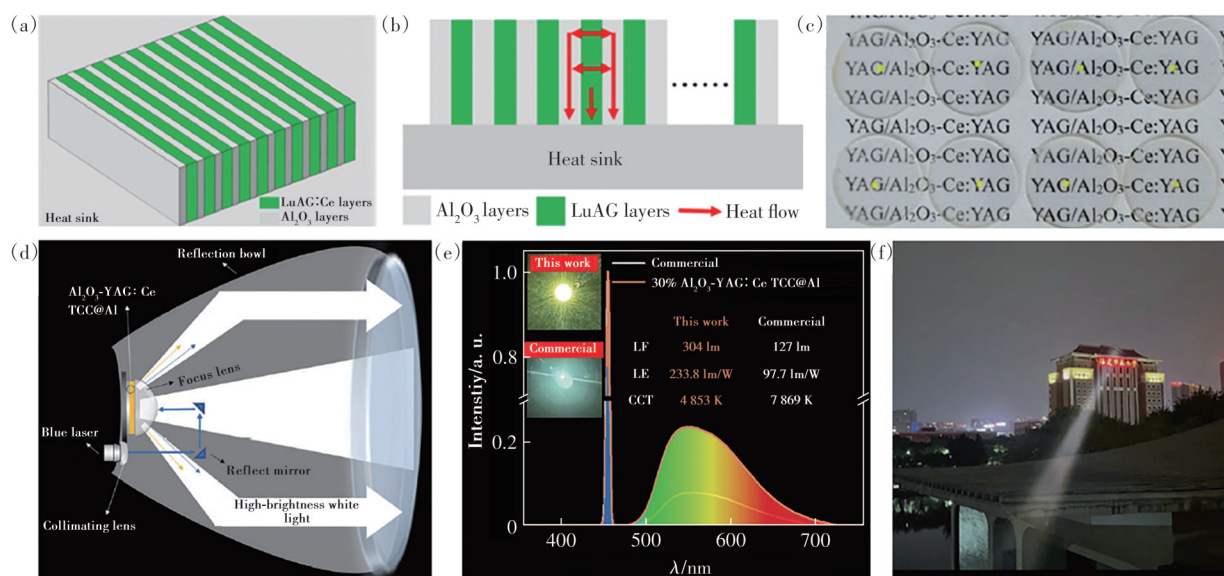


图4 层状阵列Al₂O₃-LuAG:Ce CCP的模型图(a)和热流图(b);(c)Al₂O₃-YAG:Ce/YAG陶瓷的实物图;(d)Al₂O₃-YAG:Ce@Al的激光驱动照明装置和光路示意图;(e)Al₂O₃-YAG:Ce@Al的激光驱动照明EL光谱和点亮图;(f)室外照明效果图

Fig.4 Model diagram (a) and heat flow diagram (b) of the layered array Al₂O₃-LuAG:Ce CCP. (c) Physical pictures of Al₂O₃-YAG:Ce/YAG ceramic. (d) Al₂O₃-YAG:Ce@Al schematic diagram of laser driven lighting device and optical path. (e) Al₂O₃-YAG:Ce@Al EL spectrum and lighting photographs of laser driven lighting. (f) Outdoor lighting effect drawing

综上所述,高导热复合结构荧光材料能够有效传导荧光陶瓷在高功率激发下产生的废热(在

高功率激发下荧光材料因非辐射能量转换产生的无效热能),该类材料适用于大功率、高亮度的室

内外照明场景。然而,在高温服役时,荧光陶瓷与高导热材料之间的热膨胀系数差异导致二者之间产生较大的热应力,影响荧光陶瓷的工作可靠性和发光性能,并且二者的界面润湿性和界面热阻仍需要精细化调控。因此,开发界面润湿和膨胀系数匹配的高导热荧光材料对固态照明器件的发展具有重要意义。

2.3.2 高导热基底+荧光玻璃的复合结构荧光材料

目前,为了提升荧光玻璃的散热性能,研究人员将 PiG 以薄膜形式沉积于高热导率衬底表面(如蓝宝石和 Al_2O_3 陶瓷等)^[60]。然而,由于该类荧光体的导热性能有限, PiGF@蓝宝石/ Al_2O_3 陶瓷的复合结构荧光仍然面临着严重的发光饱和问题。针对该问题,科研人员不断探索新型高导热材料作为衬底,以便荧光玻璃能够稳定承受更高功率密度的蓝光激光照射,从而拓宽其在高功率激光应用领域的潜力。

2023 年,华中科技大学彭洋团队^[61]提出“银层界面-铜块散热”的复合热管理策略,将 YAG:Ce PiGF 涂覆于氧化铝陶瓷基板后,通过银层键合技术将其焊接至铜散热块。银层作为高效热界面材料,显著提升了界面传热效率。在 27.42 W 激光激发下, PiGF(厚度为 100 μm)获得了 4 449 lm 的超高光通量。在 8.78 W 激发时,获得的发光效率高 187.9 lm/W (CCT=6 150 K),表面温度仅 91 $^{\circ}\text{C}$ 。该工作验证了金属-陶瓷复合结构在超高功率激光照明中的工程可行性。2024 年,该团队^[62]以金刚石为衬底,制备了 $\text{La}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}:\text{Ce}$ 荧光玻璃薄膜@金刚石的复合结构荧光材料,其热导率高达 599 W/($\text{m}\cdot\text{K}$),创同类材料纪录(图 5(a)、(b))。LSN:Ce PiGF@金刚石在 40.24 W/ mm^2 激光功率密度下无饱和现象,最大光通量突破 5 602 lm,其本质原因是金刚石的超高热扩散性能($>10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$)。如图 5(c)所示,进一步在 LSN:Ce PiGF 中引入 CASN:Eu 红色荧光粉,实现了显色指数 $R_a=89.3$ 的暖白光输出(CCT=3 200 K)。2024 年,华南农业大学雷炳富等^[63]以 BN 陶瓷为衬底,采用丝网印刷技术制备了 YAG:Ce PiGF@BN。通过调控 BN 基板的厚度实现局部废热的精准管理,使材料饱和阈值提升至 6.57 W/ mm^2 。该研究揭示了衬底厚度-热阻-发光性能的关联规律,为高功率激光照明器件的散热设计提供了理论参考。

当前,由于 PiGF 中荧光薄膜热导率较低($<1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),造成荧光薄膜上侧极易形成热积累区,使其在高功率密度激光激发时($>10 \text{ W}/\text{mm}^2$)出现热猝灭和碳化。为解决这一难题,研究人员提出了双面夹心荧光薄膜的散热方案,在荧光薄膜上下表面设计散热通道,实现其废热的高效耗散和荧光饱和阈值的增加,极大地提高了激光照明器件的服役稳定性。例如,2024 年,彭洋团队^[64]采用热压烧结法制备三明治结构 sapphire@PiGF@sapphire (S@PiGF@S) 荧光材料(图 5(d))。双蓝宝石基板形成对称散热通道,通过热压烧结将 YAG:Ce PiGF 置于两片高导热蓝宝石(热导率 $\approx 30 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)之间,实现废热热量的双向扩散,显著降低了荧光层局部温度(284 $^{\circ}\text{C}$ @46.47 W/ mm^2)。该结构通过激光入射路径优化,使高能激光光斑远离 PiGF 发光层以减少热冲击损伤。蓝宝石基板的高透光性与 PiGF 的均匀光散射特性协同延长激发光程,提升了光提取效率。实验表明,三明治式散热设计使废热热量传导更均匀,有效抑制热猝灭效应,在静态激发模式下光通量为 7 602 lm(图 5(e)~(f)),光饱和阈值(46.47 W· mm^{-2})较传统单面结构(10.89 W· mm^{-2})提升 6.3 倍。2024 年,中山大学 Mou 等^[65]通过热压成型制备了 YAG:Ce PiGF@蓝宝石@氧化铝荧光材料。材料界面 SEM 表明, YAG:Ce 薄膜与蓝宝石、氧化铝紧密贴合,没有发现微裂纹和微气孔(图 5(g)、(h))。由于双面散热与光场协同增强效应, YAG:Ce PiGF@蓝宝石@氧化铝在 30 W/ mm^2 的激光激发下获得的光通量高达 5 197 lm(图 5(i)所示)。2024 年,中国计量大学王乐课题组^[10]在蓝宝石基荧光薄膜上覆盖了一层 Al_2O_3 薄膜,形成了新型三明治结构的 PiGF。该结构使 PiGF 的饱和阈值从 14 W/ mm^2 提升至 16 W/ mm^2 ,对应的光通量也从 1 243.8 lm 提高到 1 475.9 lm。由于新型三明治结构的散射作用,有效增强了 PiGF 的光吸收率、光提取效率和发射光的均匀性。进一步引入 CASN:Eu²⁺ 荧光粉后,材料的显色指数高达 88.7。

综上所述,研究人员通过在 PiG 上下表面引入高导热基底显著地提高了材料热管理性能,器件的光色光温、光通量和发光效率都实现了新的突破。然而,夹心式双面结构对荧光层的要求较高,需要精确控制薄膜的厚度、涂覆面积和上下层间夹持力。

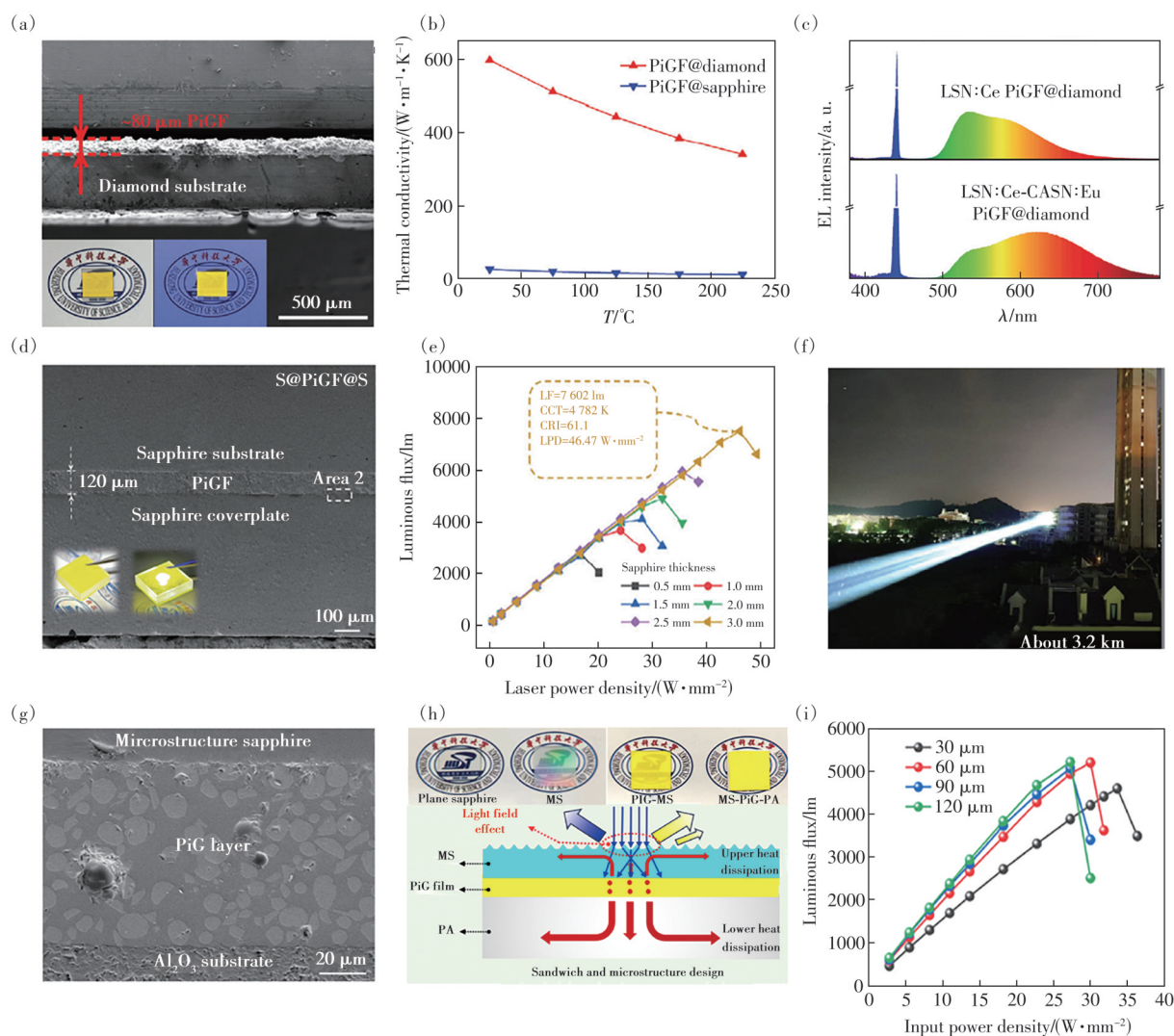


图5 (a) LSN:Ce PiGF@金刚石断面SEM图像和实物图;(b) PiGF@金刚石和PiGF@蓝宝石在不同温度下的热导率;(c) LSN:Ce PiGF@金刚石和LSN:Ce-CASN:Eu PiGF@金刚石的EL光谱;(d) S@PiGF@S的断面SEM图像、实物图和点亮图;(e)不同蓝宝石厚度下S@PiGF@S的光通量;(f) S@PiGF@S在激光驱动下的户外照明图;(g) YAG:Ce PiGF@蓝宝石@氧化铝的断面SEM图像;(h) YAG:Ce PiGF@蓝宝石@氧化铝的原理图;(i)不同厚度的YAG:Ce PiGF@蓝宝石@氧化铝的光通量

Fig.5 (a) SEM images and physical drawings of LSN:Ce PiGF@diamond section. (b) The thermal conductivity of PiGF@diamond and PiGF@sapphire at different temperatures. (c) EL spectra of LSN:Ce PiGF@diamond and LSN:Ce-CASN:Eu PiGF@diamond. (d) SEM images, physical drawings and lighting photographs of S@PiGF@S. (e) LF of S@PiGF@S at different sapphire thicknesses. (f) S@PiGF@S outdoor lighting diagram under laser drive. (g) SEM image of YAG:Ce PiGF@sapphire@alumina section. (h) Schematic diagram of YAG:Ce PiGF@sapphire@alumina. (i) LF of YAG:Ce PiGF@sapphire@alumina of different thicknesses

2.4 荧光材料特殊构型设计

随着高功率激光/LED照明技术向超大功率、超高光通量方向发展,传统荧光材料体系在三维光场调控、瞬态热冲击、耐受性和光谱精准适配等方面面临严峻挑战。在此背景下,荧光材料的构型设计正经历从“成分调控”到“形貌工程”的范式转变,即通过构筑管状、棒状、异形和半球状等结构,实现陶瓷光-热-力多物理场的协同优化^[66-67]。

2.4.1 荧光陶瓷的特殊构型设计

传统封装模式将荧光陶瓷贴合在蓝光LED芯片上,获得的最大发光角度仅为120°^[68]。为了实现360°照明,2021年,江苏师范大学Sun等^[69]采用低压注射成型制备了YAG:Ce管状陶瓷(直径为28.5 mm,壁厚为1.5 mm,长度为81.5 mm,如图6(d)~(e)所示)。通过优化固含量(质量分数75%)将浆料黏度调至190.34 Pa·s,确保陶瓷内部

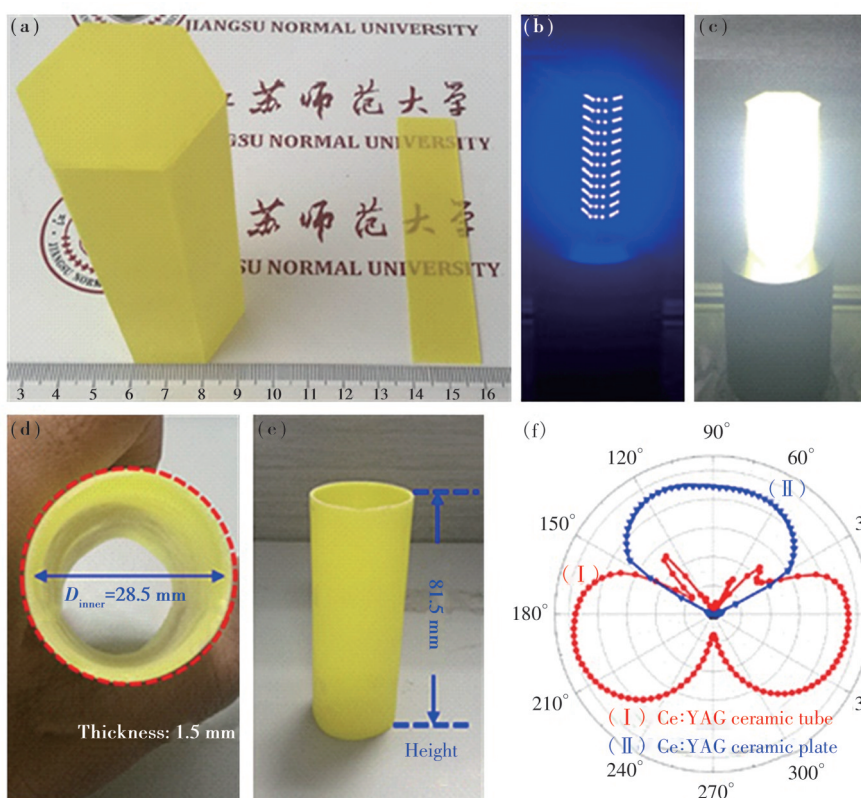


图 6 (a)六面体结构 YAG:Ce 管状陶瓷实物图;(b)LED 芯片点亮图;(c)管状陶瓷基 LED 器件点亮图;(d)~(e)YAG:Ce 管状陶瓷实物图;(f)管状和盘状 YAG:Ce 陶瓷构建白光 LED 光源的视角的关系

Fig.6 (a) Physical diagram of hexahedral structure YAG:Ce tubular ceramic. (b) Lighting photographs of hexahedral structure LED chip. (c) Lighting photographs of tubular ceramic-based LED device. (d)~(e) Physical diagram of YAG:Ce tubular ceramics. (f) Relationship between viewing angle of tubular and disc YAG:Ce ceramics for building white LED light sources

无缺陷高致密(800 nm 处的透过率为 72.5%)。基于全内反射-散射协同效应的管状几何设计,使蓝光在管壁内均匀激发 YAG:Ce 荧光层。六面体柱状芯片阵列(图 6(c))实现蓝光多角度入射,突破传统平面陶瓷 120° 发光限制,形成 360° 全空间 4π 白光辐射(图 6(f))。通过双面抛光工艺减少界面光损耗,在 350 mA 驱动下实现 126.46 lm/W 高发光效率及 4 333 K 低色温输出。

2024 年,江苏师范大学 Chen 等^[70]采用凝胶注模成型结合真空烧结技术制备了棒状 YAG:Ce 荧光陶瓷和盘状 YAG:Ce 荧光陶瓷(体积为 100π ,如图 7(a)所示)。与盘状 YAG:Ce 荧光陶瓷相比,在透射激发模式下棒状荧光陶瓷能够使绝大多数蓝光以全内反射(TIR)的临界角穿过轴向的整个长度,这种特性使得 Ce^{3+} 离子能够吸收更多蓝光,进而提高光提取效率,如图 7(b)~(c)所示。当激光功率密度为 47.8 W/mm^2 时,所有棒状 YAG:Ce 荧光陶瓷均未出现发光饱和,获得的发光效率高达 $245\sim 274 \text{ lm/W}$,显色指数为 56.3~59.5,相关色温

为 $4\,509\sim 4\,478 \text{ K}$ 。2023 年,南京工业大学 Zhu 等^[71]采用凝胶注模成型结合模具设计的方法,制备了 YAG 陶瓷纤维(直径为 $147 \mu\text{m}$ 、长度为 113 mm,如图 7(d)~(e)所示),研究了浆料固含量对陶瓷纤维的影响。结果表明,在浆料的固含量 52(体积百分比)时,厚度为 2 mm 的 YAG 陶瓷纤维在 800 nm 处的透过率高达 82.6%,如图 7(f)所示,抗弯强度为 $(1\,124\pm 86) \text{ MPa}$ 。

2017 年,飞利浦公司 Boer 等^[72]推出了棒状 Ce:LuAG 荧光陶瓷(尺寸为 $64 \text{ mm}\times 1.9 \text{ mm}\times 1.2 \text{ mm}$)基绿光 LED,如图 8(b)所示。棒状 Ce:LuAG 荧光陶瓷被位于其两侧的蓝光 LED 激发以产生绿光,且产生的大部分绿光能够被右侧的复合抛物线聚光器(CPC)提取。该模块的机械结构如图 8(e)所示,陶瓷由两个冷却块固定用于散热。在输入蓝光功率为 265 W 时,获得了集光率、峰值亮度和最大光通量分别为 $17 \text{ m}^2\cdot\text{sr}$ 、 $2.1\times 10^9 \text{ cd/m}^2$ 和 $3.5\times 10^4 \text{ lm}$ 。与块状荧光陶瓷相比,由于棒状荧光陶瓷长径比的特点,更有利于光在其内部传播,从而

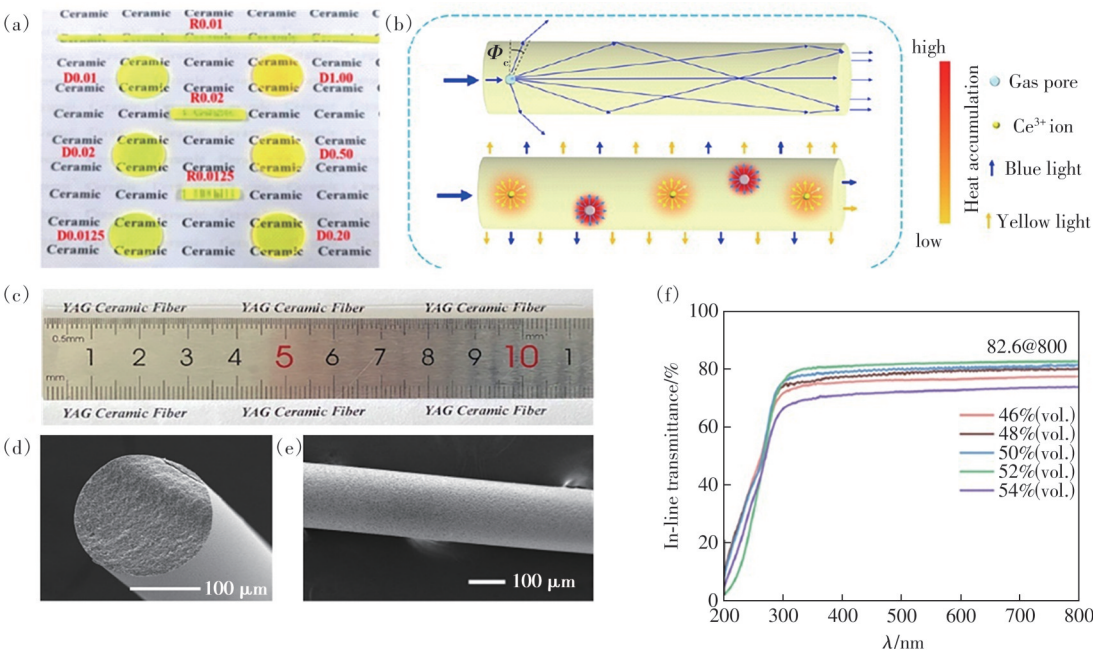


图 7 (a)棒状 YAG:Ce 陶瓷实物图;(b)棒状 YAG:Ce 陶瓷对激发光光程的影响示意图;YAG 陶瓷纤维的实物图(c)、SEM 图像((d)~(e)) 和透光率光谱(f)

Fig.7 (a)Physical photographs of rod-shaped YAG:Ce ceramics. (b)Schematic diagram of the influence of rod-shaped YAG:Ce PC on the optical path of excitation light. Physical image(c) , SEM image((d)–(e)) and transmittance spectra(f) of YAG ceramic fibers

提高了光提取效率。2019 年,中国科学院上海硅酸盐研究所胡松等^[73]采用光固化 3D 打印技术制备了棒状 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG:Ce}$ 荧光陶瓷,如图 8(d)、(f)所示。通过优化光敏树脂悬浮液固含量及剪切流变特性,实现 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG:Ce}$ 复合粉末的均匀分散与高精度成形,突破传统成型工艺对复杂几何结构的限制。光固化层积形成的 Al_2O_3 导热网络结合 MgO 的晶界强化作用,显著抑制了高功率激光激发时的热猝灭效应。 Al_2O_3 颗粒作为光散射中心延长蓝光激发路径,在提升 YAG:Ce 量子效率的同时利用宽禁带特性减少光子再吸收损耗。经脱脂与真空烧结工艺优化,陶瓷致密度达 99.3%,光饱和阈值突破 20.7 W/mm^2 。2023 年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Li 等^[74]采用 HDDA、PEGDA 与 TPO 混合制备光固化树脂,加入分散剂 OA 和 PEG-400,经球磨制得 50 体积百分比固含量的 LuAG:Ce 陶瓷油墨。通过数字光处理(DLP)技术,设置层厚 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、单层曝光 6 s (80 mJ/cm^2) 完成打印。生坯经 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥 4 h 后,依次进行 $1\text{ }200\text{ }^\circ\text{C}$ 预烧结和 $1\text{ }800\text{ }^\circ\text{C}$ 真空烧结 10 h,获得半球形透明陶瓷(凸曲率半径为 11 mm 、凹曲率半径为 10 mm 、厚度为 1 mm)。该陶瓷与蓝光激光器构建的器件展现出优异性能,饱和阈值达 19.22 W/mm^2 。

2024 年,江苏师范大学 Kang 等^[75]将棒状 LuAG:Ce 透明陶瓷硅装在圆形陶瓷片上制备了复合结构荧光陶瓷,如图 8(a)所示。在 3.5 W 蓝光激光激发下,获得了发光效率为 $150\sim 180\text{ lm/W}$ 。此外,由于蓝光的逐渐吸收和热量的梯度分布,棒状 LuAG:Ce 透明陶瓷能够承受 46 W/mm^2 的功率密度且未发生荧光饱和现象。

2. 4. 2 荧光玻璃的特殊构型设计

2023 年,南通大学 Tian 等^[76]采用 Isobam-APS 体系,通过凝胶注模成型制备了大尺寸半球形 YAG:Ce 荧光玻璃,如图 8(g)~(h)所示。半球结构显著降低了陶瓷的全内反射(TIR)。此外,大尺寸半球外形增加了散热面积,在 100 W 的蓝光 LED 芯片照射 600 s 后,中心最高温度仅为 $64\text{ }^\circ\text{C}$ 。2024 年,厦门大学 Wang 等^[77]同样采用 Isobam-APS 体系的凝胶注模技术制备了不同形状的荧光玻璃,如图 8(c)所示。所制备的荧光玻璃在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 的发射强度保留了室温的 85%,量子效率高达 96.39%。将荧光玻璃与蓝光 LED 构建为器件,当驱动电流为 100 mA 时,获得的发光效率为 94.08 lm/W 。

综上所述,荧光材料的构型设计可以有效减少全内反射,提高光线的出射概率,从而增加光提取效率。另一方面,该方案可以增加荧光材料与环

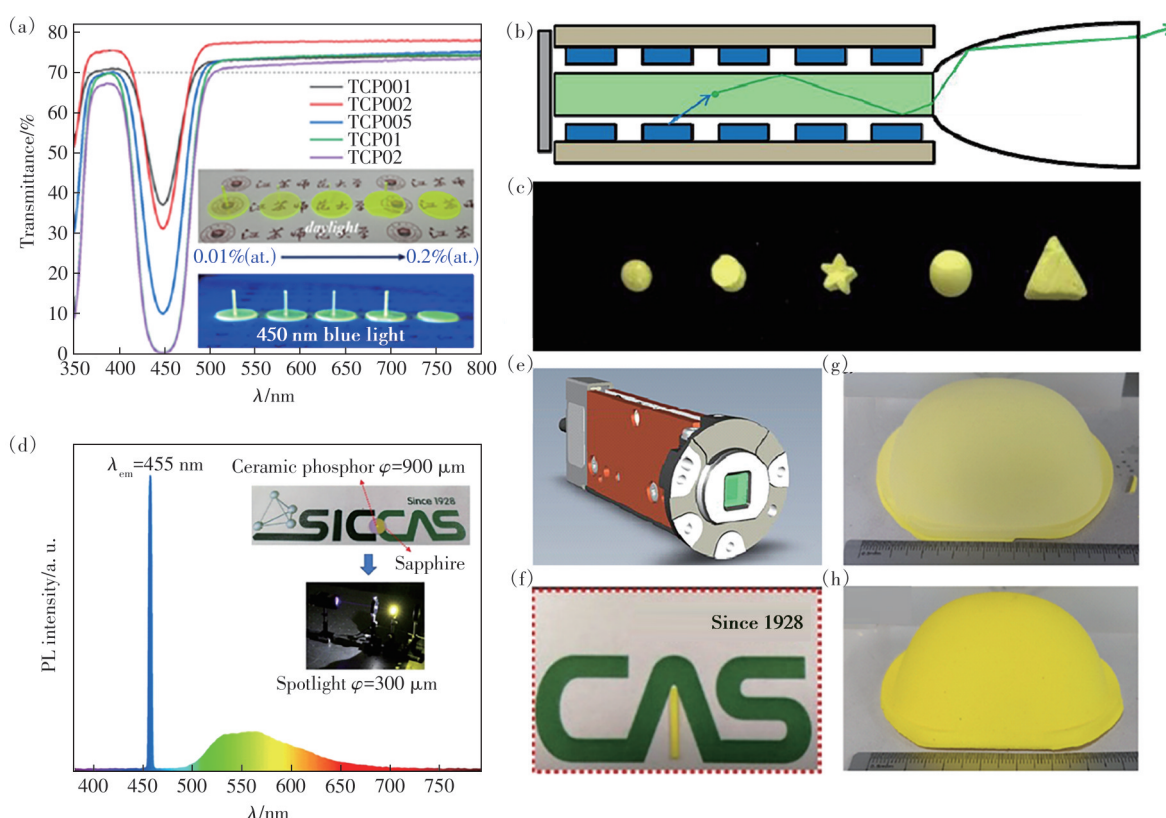


图 8 (a) LuAG:Ce 陶瓷的透光率光谱以及实物图; (b) 棒状 Ce:LuAG 陶瓷器件的原理图; (c) PiGs 的实物图; (d) 棒状 Al_2O_3 -YAG:Ce 陶瓷的 EL 光谱以及点亮图; (e) 机械结构图; (f) 棒状 Al_2O_3 -YAG:Ce 陶瓷的实物图; (g)~(h) 半球形玻璃的实物图

Fig.8 (a) The transmittance spectra and physical images of LuAG:Ce ceramics. (b) Schematic diagram of rod-shaped Ce:LuAG ceramic device. (c) Physical images of PiGs. (d) EL spectrum and lighting photographs of rod-shaped Al_2O_3 -YAG:Ce ceramics. (e) Mechanical structure drawings. (f) Physical image of rod-like Al_2O_3 -YAG:Ce ceramics. (g)~(h) Physical image of hemispherical PiG

境的接触面积,有利于废热的快速耗散,提高材料的服役稳定性。此外,特殊的构型设计不仅可以节约材料使用量,还可以有效拓宽材料的使用范围,特别适用于对光提取效率和发光均匀性要求较高的场景。然而,复合结构荧光材料的构型设计面临着制备工艺、成型方法和光束路径的多重挑战。

3 荧光材料的微观结构设计

荧光材料宏观异质结构设计策略显著提高了激光/LED 照明器件的光色光温和散热性能。然而,在高功率激光照明系统中,约 15%~30% 的入射蓝光因未被有效散射和转换而直接穿透荧光层,引发“黄环效应”(在高功率激光激发下,荧光层中心区域因热积累导致蓝光穿透,边缘因散射形成黄光环的现象),即中心区域呈现冷白光($\text{CCT}>8\,000\text{ K}$),边缘形成高饱和度黄光环带,导

致光束均匀性劣化。因此,如何在兼顾荧光材料散热性能和发光品质的前提下,增强材料的光提取效率和光均匀性是其器件化应用亟需解决的技术难题。

3.1 荧光陶瓷

目前,国内外研究人员主要通过引入散射中心来调控荧光陶瓷内部的微观结构,这对于提高光的吸收与提取效率、实现泵浦光与转换光的均匀混合以及限制光斑扩张等方面具有至关重要的作用。荧光提取效率和发光均匀性对荧光材料的光散射性能有着极高的要求。研究人员常见的提高材料散热性能的方法有引入第二相和微气孔等^[78]。例如,2018 年,加州大学 Cozzan 等^[79]将商用 YAG:Ce 与 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉体(粒径 $0.71\text{ }\mu\text{m}$)混合,通过 SPS 技术制备了 Al_2O_3 -YAG:Ce 荧光陶瓷。在 6.82 W 蓝光激光激发下,复相陶瓷的发光效率和光通量明显优于相同规格单晶。2019 年,中国科

学院上海硅酸盐研究所 Liu 等^[80]采用 SPS 烧结技术,以商业 YAG:Ce 粉体 (1~5 μm) 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉体 (0.20~0.30 μm) 为原料,制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG:Ce}$ 荧光陶瓷。通过调节烧结压力,陶瓷孔隙率从 0.65% 降至 0.34%,热导率最高达 24.9 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。由于陶瓷内部微气孔数量减小,样品的直线透过率从 62.9% 增加至 66.9%。孔隙率最高的陶瓷在 455 nm 蓝光 LD 激发下,获得的发光效率为 305 lm/W ,发光率高达 1 796 lm/mm^2 。2019 年,厦门大学解荣军课题组^[81]利用高导热 Al_2O_3 (32.5 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 构建热传导路径,通过 Al_2O_3 基体包裹 YAG:Ce 荧光颗粒,制备出 YAG:Ce- Al_2O_3 复相荧光陶瓷。 Al_2O_3 的引入使材料整体热导率从 10.2 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提升至 32.5 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,其晶界处的光散射效应延长蓝光激发路径,使陶瓷发光中心得以充分利用。当 Al_2O_3 质量分数达 60% 时,复相陶瓷的微观结构实现热流扩散与光场均匀分布的动态平衡,高导热效率抑制了陶瓷热猝灭效应,荧光颗粒的高分散度维持 84.1% 的量子效率。在 20.1 W/mm^2 蓝光激发下,光饱和阈值较传统单相陶瓷提升 6.3 倍,获得 1 367 lm 光通量及 982 Mcd/m^2 超高亮度输出。2023 年,中国科学院上海硅酸盐研究所李江等^[82]采用共沉淀法制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ce:YAG}$ 复相荧光陶瓷。将 40% $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ce:YAG}$ 荧光陶瓷与 450 nm 蓝光 LD 采用反射模式封装,在驱动功率为 7.05 W 时,获得的相关色温为 6 498 K,色坐标为 (0.31, 0.38),光通量为 1 169 lm ,发光效率为 166 lm/W 。同年,李江等^[83]采用固相反应法制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-LuAG:Ce}$ 复相荧光陶瓷,原料为 Lu_2O_3 、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (纯度为 99.99%) 和 CeO_2 。通过添加 Al_2O_3 相,有效提高了陶瓷的内量子效率和热稳定性。在驱动功率为 16.4 W 的蓝光激光激发下, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-LuAG:Ce}$ 的发光效率为 230~283 lm/W 。2024 年,中国计量大学王乐等^[84]采用 SPS 技术,以商业 YAG:Ce (Langda) 与高纯 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉体 (TM-DAR, 99.99%) 为原料,制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG:Ce}$ 复相荧光陶瓷,研究了材料在透射和反射模式下的发光性能。结果表明,反射式下的荧光陶瓷相较于透射式具有更优异的散热性能,且可承受更高功率的激光激发,但其光均匀性因镜面反射现象而相对降低。将厚度为 0.5 mm 复相荧光陶瓷与 5 W 激光构建为汽车前照灯,相应光源的光通量为 1 206 lm 、发光效率为 241.2 lm/W 、相关色温为 5 749 K。

在调整荧光陶瓷基质化学组分的同时引入高导热材料,不仅能够实现发射光谱的红移和半高宽的展宽,提升荧光陶瓷的显色指数,而且还可以显著提高其在高功率激光照射下的散热性能,有效避免热猝灭效应,从而大幅提高荧光陶瓷的发光效率和长期稳定性。例如,2019 年,中国科学院上海硅酸盐研究所李江等^[85]采用固相反应法制备了复相荧光陶瓷 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ce:GdYAG}$ 。通过引入 Al_2O_3 作为第二相散射中心,一方面显著提高了荧光陶瓷的热导率,另一方面也改变了陶瓷中光的传播方向,进而使得荧光陶瓷对蓝光的吸收能力和提取效率得以增强。选择 Al_2O_3 与 GdYAG:Ce 量比为 0.8 的复相荧光陶瓷与蓝光 LED 芯片封装为器件,获得的显色指数为 71.4,发光效率为 112.6 lm/W (电流为 27 mA)。2022 年,中国科学院福建物质结构研究所郭旺等^[86]采用真空烧结技术制备了 (Ce,Gd):YAG- Al_2O_3 复相荧光陶瓷。随着 Al_2O_3 的质量分数从 0% 增加至 40%,陶瓷的热导率从 7.244 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加至 13.944 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。40% $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-(Ce,Gd):YAG}$ 荧光陶瓷在驱动电流为 1.3 A 的蓝光 LED 激发下,发光效率最大值达 109.49 lm/W ,与未添加 Al_2O_3 的样品相比提高了 8.54%。2023 年,北京科技大学李建强等^[87]采用玻璃晶化法制备了 (Lu,Gd) $_3\text{Al}_5\text{O}_{12}\text{-Al}_2\text{O}_3$ 透明陶瓷。随着 Gd^{3+} 掺杂浓度的增加,发射峰从 510 nm 红移至 570 nm,在 780 nm 处的透过率为 81.0%。将 Gd^{3+} 掺杂浓度为 20% 的 Ce:LuGAG- Al_2O_3 陶瓷与 10 W 的蓝光 LED 封装,获得的色坐标为 (0.356 6, 0.435),相关色温为 4 347 K,显色指数为 67.7,发光效率为 175.8 lm/W 。在功率密度为 5 W/mm^2 蓝光 LD 激发下,由于引入第二相 Al_2O_3 为散射中心来提高光提取效率,最终获得的发光效率高达 240.04 lm/W 。2024 年,东北大学孙旭东等^[88]在 1 600 $^\circ\text{C}$ 空气环境下烧结,采用热等静压 (1 700 $^\circ\text{C}$) 法制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-GAGG:Ce}$ 复相荧光陶瓷。 $\text{Gd}^{3+}/\text{Ga}^{3+}$ 共掺杂增强了 GAGG:Ce 晶体的晶体场强度,促使 Ce^{3+} 的 5d 能级分裂加剧,导致发射光谱红移 31 nm 且半高宽拓宽至 128 nm,显著提升了红光成分占比。 Al_2O_3 (热导率为 32~35 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 使材料整体热导率提升 72% (13.2 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),有效抑制了高功率激光激发时的热猝灭效应。 Al_2O_3 的光散射作用与 GAGG:Ce 的宽谱发射协同降低光子重吸收,在蓝光 LD 激发下,获得

了显色指数达 71.4、相关色温降至 4 352 K 的暖白光。

除了采用高导热 Al_2O_3 外, MgO 、 AlN 、 BaAl_2O_4 也被广泛用于提高荧光陶瓷的光提取效率和热导率。例如, 2021 年, 东北大学孙旭东课题组^[89]采用真空烧结技术制备了 MgO-YAG:Ce 复相荧光陶瓷。该陶瓷在 25~200 °C 温度范围内的热导率比 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG:Ce}$ 陶瓷高出 14%~21%。在功率密度为 1 W/mm² 的蓝光 LD 激发下, 获得的发光效率高 292 lm/W。此外, 样品的发光饱和阈值高达 32.2 W/mm², 对应的光通量达到 3 979 lm。2021 年, 中国计量大学王乐等^[90]以纯 YAG 作为第二相, 制备了 YAG-YAG:Ce 复相透明陶瓷。在 1 700 °C 烧结温度下样品的透过率为 65% (厚度为 0.5 mm), 热导率为 8.9 W/(m·K), 外量子效率高达 70.2%。在功率密度为 9.60 W/mm² 蓝光 LD 激发下, 发光度高达 1 220 lm/mm²。2024 年, 中国科学院福建物质结构研究所郭旺等^[91]采用真空烧结技术制备了 MgO-YAG:Ce 复相陶瓷。引入摩尔分数 1.0% MgF_2 作为液相烧结助剂, 在 1 400 °C 真空烧结中促进 MgO 与 YAG:Ce 的界面相容性, 获得致密度达 99.3% 的复合结构。 MgO 基体凭借超高热导率 (47~53.5 W/(m·K)) 增加了陶瓷的散热效率, 有效抑制局部温升。在 34.06 W/mm² 蓝光激光激发下, 获得的光通量为 2 834 lm, 发光效率为 166 lm/W。2024 年, 李江等^[92]采用共沉淀法制备了 $\text{BaAl}_2\text{O}_4\text{-}$

LuAG:Ce 复相荧光陶瓷。通过引入 BaAl_2O_4 作为散射中心, 有效减少全反射, 提高了复相荧光陶瓷的光提取效率。质量分数 3% $\text{BaAl}_2\text{O}_4\text{-LuAG:Ce}$ 复相荧光陶瓷在功率为 10.8 W 的 450 nm LD 激发下, 获得的最佳光通量为 2 244 lm, 发光效率为 208 lm/W。2021 年, 大阪大学 Fujioka 等^[93]报道了 AlN-YAG:Ce 复相荧光陶瓷。 AlN 第二相引入后, 陶瓷的热导率增加至 19.2 W/(m·K), 但陶瓷内存在少量的氮氧化物。在 2.4 W 蓝光 LD 激发下, 获得的光通量为 639 lm, 发光效率为 266 lm/W, 相关色温为 4 909 K。

此外, 在陶瓷基质中巧妙地引入微气孔作为光学散射中心, 能够显著削弱荧光陶瓷中固有的全内反射效应, 增加光在陶瓷内部的传播路径, 促使更多光子发生折射和散射。如图 9(a) 所示, 这种微观结构的调控显著提升了光提取效率, 增加了从陶瓷体向外辐射的有效光通量。因此, 通过控制微气孔的数量和尺寸, 能够调整荧光陶瓷的透光性、散射性能、发光效率、光斑的形态和光强分布。例如, 中国科学院上海硅酸盐研究所王士维等^[94]采用固相反应法制备了多孔 LuAG:Ce 荧光陶瓷, 如图 9(b) 所示, 其在 450 K 时发射强度保留了室温的 90%。在 1 650 °C 烧结温度下, 陶瓷的孔隙率为 2.88%, 样品的发射强度最高。在 450 nm 蓝色 LD 激发下, 多孔 LuAG:Ce 荧光陶瓷的最大发光效率超过 200 lm/W。此外, 在激光远程激发测

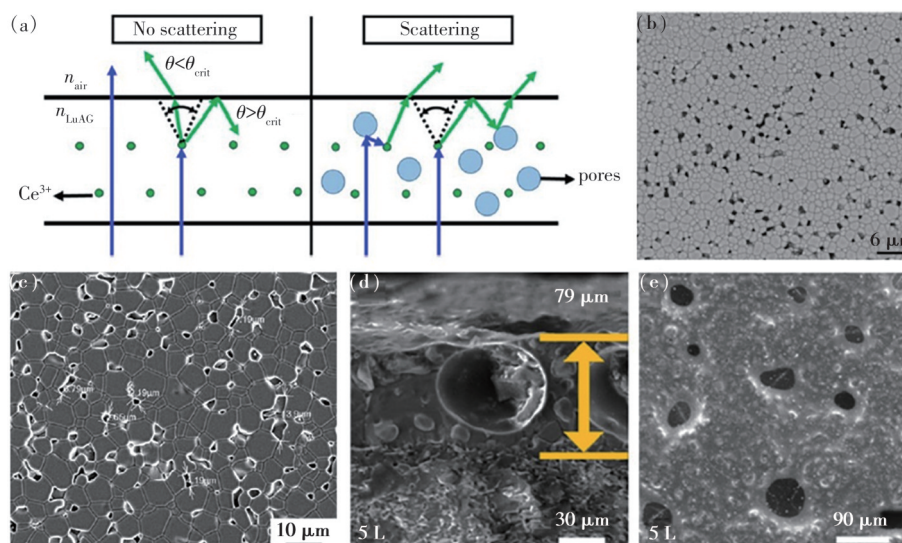


图 9 (a)~(b) 气孔作为散射中心的 LuAG:Ce 陶瓷内部光传播路径示意图; (b) 多孔 LuAG:Ce 荧光陶瓷的 SEM 图像; (c) 多孔 YAG:Ce 荧光陶瓷的 SEM 图像; (d)~(e) YAG:Ce PiGF 的横截面和表面 SEM 图像

Fig.9 (a)~(b) Schematic diagram of the internal light propagation path of LuAG:Ce ceramics with pores as scattering centers. (b) SEM images of porous LuAG:Ce phosphor ceramics. (c) SEM images of porous YAG:Ce phosphor ceramics. SEM images of cross section (d) and surface (e) of YAG:Ce PiGF

试系统中,陶瓷在动态和静态模式下的转换效率分别高达 50.2% 和 44.4%。中国科学院上海硅酸盐研究所李江等^[95]采用固相反应法制备了具有不同孔隙率和不同微孔尺寸的 YAG:Ce 荧光陶瓷,如图 9(c)所示,并研究了孔隙率和微孔孔径对 Ce:YAG 陶瓷微观结构、光斑限制能力和光学性能的影响。结果表明,孔隙率为 10(体积百分比)、孔径为 3 μm 的荧光陶瓷表现出良好的光斑限制能力。在蓝光激光激发下,陶瓷的光通量高达 3 430 lm,中心亮度为 1 669 592 cd/m^2 。孔径为 5 μm 的 Ce:YAG 荧光陶瓷在功率密度为 30 W/mm^2 蓝光激光激发下,最大发光效率为 268 lm/W 。

综上所述,通过在陶瓷中引入高导热的第二相不仅能够增强光提取效率和发光效率,而且还可以在物理层面上大幅提升陶瓷的热运输性能,有效缓解因热积累而导致的热致猝灭和光衰等问题。在陶瓷中引入微气孔能够有效提升发光效率,但微气孔的存在也显著降低了基质的导热系数。因此,有必要引入新型陶瓷微结构设计,兼顾材料的热传导、光提取效率、光束质量和品质。

3.2 荧光玻璃

引入高导热介质和微气孔的策略同样也适用于荧光玻璃。例如,2020 年,华南农业大学雷炳富等^[96]采用丝网印刷技术制备了 AlN-YAG:Ce PiGF。通过在 PiGF 内部引入 AlN 颗粒,将积聚的热量迅速传导至周围空气和蓝宝石基板。在 10.99 W/mm^2 的蓝色激光功率密度下,质量分数 10% AlN-PiGF 的最高表面工作温度比未加入 AlN 的样品降低了 266.9 $^{\circ}\text{C}$ 。此外,AlN 颗粒还作为散射中心,使得 AlN-YAG:Ce PiGF 的发光效率高达 133 lm/W ,相应的光通量为 1 000 lm。2022 年,中国计量大学王乐等^[97]以蓝宝石为基底,通过在 $\text{La}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}:\text{Ce}^{3+}$ PiGF 中引入 Al_2O_3 颗粒,制备了复合荧光玻璃薄膜。通过优化玻璃/ Al_2O_3 质量比,在玻璃基体中形成高密度热传导路径,有效抑制局部温度升高。 Al_2O_3 颗粒通过光散射效应延长了蓝光激发路径,提高 $\text{LSN}:\text{Ce}^{3+}$ 的光转换效率(量子效率 $\approx 85\%$),并减少黄-蓝光交叉再吸收。当玻璃基质与 Al_2O_3 的质量比为 2:5、厚度为 50 μm 时,样品表现出优异性能,其饱和阈值高达 23.08 W/mm^2 ,光通量为 2 886 lm,显色指数为 69.7,相关色温为 6 612 K。2023 年,温州大学向卫东课题组^[98]采用刮刀法制备了 Ce:GdYAG PiGF。通过引入微米级 BN 作为光散

射中心,增强了 PiGF 的散热性能和孔隙率,样品的光热性能得到了极大的提升。当 BN 的含量从 0 提高至 12% 时,PiGF 的热导率从 6.4 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提升至 13.0 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,热扩散系数从 1.571 mm^2/s 增加到 4.227 mm^2/s ,同时最大饱和阈值从 3.12 W/mm^2 提升至 5.42 W/mm^2 ,最大光通量从 260.6 lm 增加到 354.1 lm。2023 年,河南理工大学徐坚等^[99]采用丝网印刷技术制备了多孔 YAG:Ce PiGF,如图 9(d)~(e)所示。研究发现,随着薄膜厚度增加,孔径也随之增大。通过引入微气孔作为散射中心,有效扩散了入射激光,实现了材料均匀发光。在蓝光 LD 激发下,厚度为 60 μm 的 YAG:Ce PiGF 获得了发光效率高达 261 lm/W ,饱和阈值为 9.1 W/mm^2 ,峰值发光出射度为 1 244 lm/mm^2 (光通量为 3 839 lm)。

综上所述,在荧光材料中引入高导热介质和微气孔能够显著提高光提取效率及发光均匀性,适用于高光提取效率和均匀发光的应用(如舞台灯、户外照明等)。然而,引入散射中心和微气孔会降低材料单位质量块体内的有效发光中心数量,不利于获得高光通量白光。此外,微气孔会恶化材料的热传导路径,增加声子散射,进而降低热导率。

4 复合结构荧光材料的应用

荧光转换型激光白光和 LED 白光照明器件对荧光材料的光热性能有着差异化要求(如激发源功率密度、热冲击、结构形状、荧光饱和阈值和光谱覆盖区域等方面)。

4.1 LED 白光照明用复合结构荧光材料

蓝光 LED 芯片(相当于面光源)的功率密度通常维持在 5 W/mm^2 以下,其产生的热冲击或者材料峰值温度相对较弱。LED 白光照明的封装通常采用蓝光 LED 芯片+荧光材料的形式,并且荧光材料的面积与 LED 芯片发光面积需要匹配^[100]。例如,江苏大学 Yao 等^[101]采用 PIBM 凝胶方法结合真空烧结技术制备了大尺寸 YAG:Ce 陶瓷圆片,其直径比传统干压成型大 4 mm,在相同 LED 激发源下,其平均降温可达 20~30 $^{\circ}\text{C}$ 。从该实验结果发现,大横截面尺寸的荧光材料有助于 LED 白光照明器件的热管理。同时,蓝光 LED 芯片的低功率密度特性使荧光材料不易出现发光饱和。因此,LED 白光照明用复合结构荧光材料的研究需要偏重发光效率、色度性能(光色、光温和

均匀性)、材料的浓度/几何参数和发光稳定性,其结构多为复合结构荧光薄膜、块体或透镜结构。

4.2 激光白光用复合结构荧光材料

激光照明采用的蓝光激光激发源(相当于点光源)功率密度普遍超过 10 W/mm^2 ,这种量级对荧光材料的热稳定性和散热性能提出了严苛要求。通常需要引入高热导率基底和特殊散热设计。此外,激光照明中激光光束产生的局部高温极易诱发荧光材料的热猝灭,导致非线性发光衰减和色坐标漂移^[102]。这要求荧光材料具备跨介质、跨尺度热输运调控能力,与高导热介质紧密结合并构建低热阻三维散热结构,达到材料-结构协同设计以提高饱和阈值。同时,激光照明激发源受限于受高斯光束特性,需要协同考虑荧光材料(端侧面形状、浓度分布和构型)、光路设计、散热路径和器件封装结构。因此,激光照明用复合结构荧光材料需要兼具优异的热导率和抗热冲击能力,以克服瞬态热应力导致的材料失效问题。

4.3 荧光材料产业化应用案例

随着荧光材料、激发源和封装技术的不断发展,荧光陶瓷/玻璃的产业化应用已经取得实质性进展。荧光陶瓷凭借其耐高温、抗热冲击和高导热性等优势,在高端照明领域展现出显著竞争力。例如,德国肖特(SCHOTT)研发的陶瓷荧光转换器已集成于数字投影系统(如 Barco 和 Christie)中,可满足高色域和高亮度的产业需求。陶瓷荧光转换器在汽车前灯和医疗设备(如显微镜、内窥镜)的照明系统中也实现了商业化应用。此外,荧光内窥镜全球龙头企业史塞克(Steyker)推出的新一代 1788 超高清荧光硬镜,通过应用荧光陶瓷技术显著提升医疗内窥镜系统的光学性能,不仅提升了手术精准度,更以全球市场份额的领先地位巩固了其行业优势。国内方面,福建中科芯源光电科技有限公司与中国科学院福建物质结构研究所(海西研究院)联合研发的透明荧光陶瓷 LED 技术,成功突破传统荧光粉胶封装模式,推出全球首款千瓦级 KCOB 光源模组。该技术有效解决了大功率 LED 散热难题,产品寿命达 5 万小时无光衰,综合成本仅为传统卤素灯的 50%。福建中科芯源光电科技有限公司的荧光陶瓷光源模组已经应用于港口、机场和大型体育场馆等场合,并且出口至韩国、朝鲜等东北亚国家。

对于荧光玻璃,德国肖特的氢气熔炉技术与

荧光玻璃制备工艺相结合,能够进一步提升材料性能并且降低碳足迹,在汽车照明、建筑集成光伏(BIPV)等领域展示出巨大的应用潜力。包头稀土研究院首创压延法开发了铝酸盐、硅酸盐等体系的白光 LED 用荧光玻璃。安徽蚌埠片区依托中建材玻璃新材料研究总院,研发出 $30\text{ }\mu\text{m}$ 可折叠柔性玻璃,其弯折寿命超 100 万次,已应用于折叠手机及终端显示领域。

5 总结与展望

随着超大功率、超高亮度激光白光/LED 白光照明器件的快速发展,对荧光材料的性能(光学、热学和理化性能)提出了极高的要求。当前,研究人员针对荧光材料的宏观结构和微观结构设计进行了大量的研究并取得了显著的成果,但在其发光饱和机理、产热机制、热管理、蓝光吸收与光转换效率、长期服役稳定性和不同文献中荧光材料的性能差异等方面仍存在严峻的挑战。

在高功率激光激发下,荧光材料因激发态粒子布居饱和和能量传递效率问题,导致光通量非线性衰减和色度漂移。通过引入高导热介质或构建高导热复合结构能够提升饱和阈值,但荧光材料内部载流子动力学、光子-声子耦合机制、量子效率衰减本质仍需深入解析。针对高功率激发下荧光材料的发光猝灭(如 $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ce}^{4+}$ 氧化、晶格畸变)问题,通过构建高导热复合结构、多路径散热通道能够显著提升热导率,但异质界面热阻、热膨胀系数失配、局部热应力等制约了荧光材料散热效率的进一步提升。因此,亟需开发热输运调控新方法(如梯度热导层设计、空间包覆导热设计、微热流道和高导热微针等),获得热鲁棒性高品质发光的复合结构荧光材料。

为了解决 YAG:Ce 荧光材料发射光谱的青光缺失(Cyan gap)和红光成分不足问题,可通过多色发光组分复合(如 YAG:Ce/CASN:Eu)或红光离子共掺杂(如 Mn^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Pr^{3+} 等占据所需格位)实现光谱拓宽和红光补偿^[103]。针对混合型复合材料普遍存在的绿-红荧光组分间“重吸收”效应导致器件发光效率显著下降的问题,通过图案化结构设计^[104]、垂直激发多层荧光体层、空间隔离设计和引入基体等策略,能够显著降低荧光组分间的交叉吸收、发光效率与色彩品质之间的矛盾。

激光照明器件在服役过程中产生的严重热积累效应已成为制约其产业化应用的关键问题。激

光激发远程荧光体技术(将LD激发源与荧光材料空间分离)显著提升了器件的散热性能并增强了光路设计自由度^[105-106]。当前,主流的激光白光光路封装模式可分为反射式和透射式两类^[107-108]。透射式封装具有结构紧凑和光路系统简单等特点,适用于内窥镜、微型投影仪等空间受限场景。但该模式存在明显的背散射效应,不仅会造成入射光损耗,还会导致散热效率降低^[109]。相比之下,反射模式通常在荧光材料背面镀有高反射层(如铝片或银层)或直接焊接于热沉,因而更适用于舞台灯、激光电视等高功率应用需求。但是,其光路系统极其复杂^[110]。

在激光辐照条件下,YAG:Ce荧光材料会出现显著的光斑扩张现象,导致光源亮度降低和光束准直性劣化,严重制约了激光照明器件的实际应用性能^[111-118]。当前,荧光材料光斑调控的措施主要是引入微气孔作为散射中心。此外,在长时间高功率激光照射下,荧光材料(荧光薄膜、荧光玻璃、荧光单晶和荧光陶瓷)极易发生物理脱落、

碳化、热冲击崩裂。研究人员可以通过引入高热导率介质、特殊散热结构和宏/微观结构设计,有效管理荧光材料内部的热分布和散热通道。为了提升荧光材料的长期服役稳定性,亟需开发具有高热稳定性、抗热冲击和高发光效率的新型荧光材料。

针对文献报道的同类荧光体性能差异问题,根据文献推测主要原因是材料制备工艺(原料粉体粒径、形貌、烧结温度、压力)、结构参数(层厚、孔隙率)、测试条件(透射/反射模式、激光功率密度)和测试设备(不同厂家、不同批次)等存在差异,导致获得的发光效率、显色指数等数据离散。因此,亟需建立统一的材料制备和测试标准,明确激发源参数、热边界条件和测试环境等参数,推动激光照明/LED照明技术的工业化应用。

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.20250093>

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] PIMPUTKAR S, SPECK J S, DENBAARS S P, *et al.* Prospects for LED lighting [J]. *Nat. Photonics*, 2009, 3(4): 180-182.
- [3] WEISBUCH C. Review-on the search for efficient solid state light emitters: past, present, future [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2020, 9(1): 016022.
- [4] PIPREK J. Comparative efficiency analysis of GaN-based light-emitting diodes and laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(2): 021104.
- [5] BERENDS A C, VAN DE HAAR M A, KRAMES M R. YAG:Ce³⁺ phosphor: from micron-sized workhorse for general lighting to a bright future on the nanoscale [J]. *Chem. Rev.*, 2020, 120(24): 13461-13479.
- [6] 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 Photonics Rev.*, 2013, 7(6): 963-993.
- [7] LI S X, WANG L, HIROSAKI N, *et al.* Color conversion materials for high-brightness laser-driven solid-state lighting [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2018, 12(12): 1800173.
- [8] 高伟男, 许祖彦, 毕勇, 等. 激光显示技术发展的现状和趋势[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 85-91.
 GAO W N, XU Z Y, BI Y, *et al.* Present development and tendency of laser display technology [J]. *Strat. Stud. Chin. Acad. Eng.*, 2020, 22(3): 85-91. (in Chinese)
- [9] DENG T L, HALMURAT D, SHEN Z T, *et al.* Pixelated phosphor converter for laser-driven adaptive lighting [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(9): 2300240.
- [10] 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.
- [11] ZHANG D, XIAO W G, LIU C, *et al.* Highly efficient phosphor-glass composites by pressureless sintering [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 2805.
- [12] 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.* Research progress in phosphor-in-glass for solid-state lighting photothermal performance

- of phosphor-in-glass packaged chip-scale white LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(12): 1961-1968. (in Chinese)
- [13] XU J, YANG Y, WANG J, *et al.* Industry-friendly synthesis and high saturation threshold of a LuAG:Ce/glass composite film realizing high-brightness laser lighting [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2020, 40(15): 6031-6036.
- [14] 吕清洋, 薛秉国, 王婷婷, 等. 白光照明用 YAG:Ce 荧光薄膜研究进展 [J]. 发光学报, 2020, 41(11): 1323-1334. LYU Q Y, XUE B G, WANG T T, *et al.* Research progress of YAG:Ce fluorescent films for white lighting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(11): 1323-1334. (in Chinese)
- [15] ZHOU J B, WANG Y F, CHEN Y Y, *et al.* Single-crystal red phosphors and their core-shell structure for improved water-resistance for laser diodes applications [J]. *Ang. Chem.*, 2021, 133(8): 3986-3991.
- [16] 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.
- [17] MA Y L, YANG Z Z, ZHAO Y M, *et al.* New phase-construction phosphors ceramics for warm-white solid-state lighting: orange-yellow-emitting (Lu,Gd)₃(Sc,Al)₅O₁₂:Ce³⁺ [J]. *Ceram. Int.*, 2024, 50(23): 49643-49651.
- [18] 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.
- [19] 孙炳恒, 姜本学, 范金太, 等. 高显色激光照明用宽光谱远程荧光转换材料 [J]. 发光学报, 2021, 42(10): 1585-1618. SUN B H, JIANG B X, FAN J T, *et al.* Broadband-emitting remote color convertors for high color rendering laser-driven lighting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(10): 1585-1618. (in Chinese)
- [20] 彭星林, 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. Inorganic Mater.*, 2021, 36(8): 807-819. (in Chinese)
- [21] DING H, LIU Z H, HU P, *et al.* High efficiency green-emitting LuAG:Ce ceramic phosphors for laser diode lighting [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(8): 2002141.
- [22] YANG Z Z, ZHENG S, ZHUO S F, *et al.* Toward laser-driven lighting with high overall optical performance: thermally robust composite phosphor-in-glass film [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(10): 2401798.
- [23] 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 Ce³⁺ content [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2025, 14(4): 9221061.
- [24] 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.
- [25] WANG T T, XUE B G, CUI H, *et al.* Ultrasonic spray pyrolysis synthesis and photoluminescence of LuAG:Ce thin films [J]. *Materials*, 2022, 15(7): 2577.
- [26] 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. Alloy. Compd.*, 2024, 972: 172826.
- [27] LI J Y, YU Z K, ZHAO J Z, *et al.* High-brightness phosphor-converted white LDs with high color rendering through sapphire@bi-color PiGF@sapphire converter [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2025, 72(2): 778-783.
- [28] CHEN J, LAN H, CAO Y G, *et al.* Application of composite phosphor ceramics by tape-casting in white light-emitting diodes [J]. *J. Alloy. Compd.*, 2017, 709: 267-271.
- [29] WEI C, SHAO C, SANG P F, *et al.* Functional design and implementation of multilayer Ce:YAG/Cr:YAG composite transparent ceramics by tape casting for white LEDs/LDs [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2024, 44(2): 1153-1162.
- [30] LIU Z T, ZHANG L, KANG J, *et al.* Barcode-structured YAG:Ce/YAG:Ce,Mn ceramic phosphors for variable CCT and high CRI LED/LD lighting [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(15): 24914-24925.
- [31] LIU X, ZHU Y X, CHENG Z Q, *et al.* Spectrum regulation of YAG:Ce/YAG:Cr/YAG:Pr phosphor ceramics with barcode structure prepared by tape casting [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2024, 107(2): 1061-1069.
- [32] PARK H K, OH J H, KANG H, *et al.* Hybrid 2D photonic crystal-assisted Lu₃Al₅O₁₂:Ce ceramic-plate phosphor and free-standing red film phosphor for white LEDs with high color-rendering index [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, 7(8): 4549-4559.
- [33] PRICHA I, ROSSNER W, MOOS R. Layered ceramic phosphors based on CaAlSiN₃:Eu and YAG:Ce for white light-emitting diodes [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2016, 99(1): 211-217.
- [34] LIU X, QIAN X L, ZHENG P, *et al.* Composition and structure design of three-layered composite phosphors for high color

- rendering chip-on-board light-emitting diode devices [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2021, 10(4): 729-740.
- [35] YE S R, LI Y K, QIANG M, *et al.* Color tunable composite phosphor ceramics based on $\text{SrAlSiN}_3\text{:Eu}^{2+}/\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}\text{:Ce}^{3+}$ for high-power and high-color-rendering-index white LEDs/LDs lighting [J]. *Materials*, 2023, 16(17): 6007.
- [36] LIAO S X, JIN S L, PANG T, *et al.* Novel color converters for high brightness laser-driven projection display: transparent ceramics-glass ceramics film composite [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(4): 2307761.
- [37] ZHANG H T, LI Y N, LING J R, *et al.* (Sr, Ca) $\text{AlSiN}_3\text{:Eu}^{2+}$ phosphor-in-glass and YAG ceramic composites for high CRI and high-power white LEDs [J]. *Ceram. Int.*, 2023, 49(14): 23871-23877.
- [38] ZHOU T, LIU X L, LIU Q S, *et al.* Highly thermal stable and color tunable composite fluorescent ceramics for high-power white LEDs [J]. *Ceram. Int.*, 2022, 48(13): 18716-18722.
- [39] LIU Z H, HU P, FENG D K, *et al.* Laminated composite of ceramic/glass films to realize high luminous efficiency and high color quality in laser-driven white lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2024, 12(31): 11898-11906.
- [40] ZHOU C M, CHEN H, CAO Y, *et al.* MAS:Eu-YAG:Ce composite phosphor converters with excellent thermal performance and enhanced color rendering index for high-power white LDs [J]. *Ceram. Int.*, 2024, 50(14): 25908-25917.
- [41] HUANG Q G, LIN H, WANG B, *et al.* Patterned glass ceramic design for high-brightness high-color-quality laser-driven lightings [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2022, 11(6): 862-873.
- [42] HUANG Q G, SUI P, HUANG F, *et al.* Toward high-quality laser-driven lightings: chromaticity-tunable phosphor-in-glass film with “phosphor pattern” design [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2022, 16(7): 2200040.
- [43] ZHAO C, WEN Q X, BAO S Y, *et al.* Tricolor pattern design: ultrahigh thermal conductivity phosphor-in-glass film for laser illumination [J]. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2023, 11(34): 12704-12713.
- [44] LI S X, HUANG L H, GUO Y Q, *et al.* A super-high brightness and excellent colour quality laser-driven white light source enables miniaturized endoscopy [J]. *Mater. Horiz.*, 2023, 10(10): 4581-4588.
- [45] ZHANG Y T, YE Y T, ZHAO G Y, *et al.* Rational design of nitride phosphor-in-glass with robust stability and photoluminescence performance [J]. *Inorg. Chem.*, 2024, 63(19): 8889-8898.
- [46] YANG Z Z, ZHENG S, XI G Y, *et al.* Patterned phosphor-in-glass films with efficient thermal management for high-power laser projection displays [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2023, 12(11): 2075-2086.
- [47] PENG Y, YU Z K, ZHAO J Z, *et al.* Unique sandwich design of high-efficiency heat-conducting phosphor-in-glass film for high-quality laser-driven white lighting [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2022, 11(12): 1889-1900.
- [48] LIU Z H, HU P, JIANG H J, *et al.* $\text{CaAlSiN}_3\text{:Eu}^{2+}/\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}\text{:Ce}^{3+}$ phosphor-in-glass film with high luminous efficiency and CRI for laser diode lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(10): 3522-3530.
- [49] ZHANG H J, YU Z K, ZHAO J Z, *et al.* Bicolor phosphor-in-glass film with highly reflective interface design for high-quality laser-driven white lighting [J]. *Ceram. Int.*, 2024, 50(17): 30802-30809.
- [50] XIE F, ZENG W, HU Z J, *et al.* High-quality white laser diode fabricated by laser-driven tricolor PiG film-on-sapphire [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2022, 69(9): 4987-4991.
- [51] WANG H, MOU Y, LEI Z Y, *et al.* Enhanced color quality of phosphor-converted white laser diodes through bicolor phosphor-in-glass [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2021, 68(11): 5652-5655.
- [52] JIANG Z, YUAN S D, XU J, *et al.* High color rendering and high-luminance laser lighting using all inorganic nitride phosphor films [J]. *RSC Adv.*, 2023, 13(36): 25561-25570.
- [53] YE C W, ZHANG J H, HE C, *et al.* Insight into the optical evaluation of sunlike LED devices with full-visible spectrum emission based on ultra-low melting tin fluorophosphate glass for human centric lighting [J]. *J. Lumin.*, 2024, 267: 120376.
- [54] YIN X M, LIN H, ZHANG D W, *et al.* A facile way to obtain LuAG:Ce^{3+} transparent ceramic phosphor and a $\text{LuAG:Ce}^{3+}/\text{Al}$ ceramic metal integration structure [J]. *Mater. Res. Express*, 2019, 6(11): 116214.
- [55] HAGEMANN V, SEIDL A, WEIDMANN G. Ceramic phosphor wheels for high luminance SSL-light sources with >500 W of laser power for digital projection [C]. *Proceedings of SPIE 10940, Light-Emitting Devices, Materials, and Applications, San Francisco, USA*, 2019: 1094017.
- [56] LENEFF A, KELSO J F, SERRE J, *et al.* Co-sintered ceramic converter for transmissive laser-activated remote phosphor conversion [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 120(2): 021104.
- [57] SANG P F, ZHANG L, KANG J, *et al.* $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG:Ce/YAG}$ composite ceramic phosphor in a transmissive configuration for high-brightness laser-driven lighting [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(22): 40951-40964.

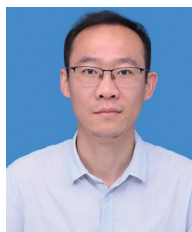
- [58] ZHANG Q, ZHENG R L, WU H Y, *et al.* Layered array $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-LuAG:Ce}$ composite ceramic phosphors for high-brightness display [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2023, 43(5): 2125-2132.
- [59] XI G Y, ZHOU Z Z, LI J, *et al.* Transparent composite ceramic@aluminum with ultra-high thermal conductivity for high-brightness laser-driven lighting [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(36): 2401026.
- [60] YOU S H, LI S X, ZHENG P, *et al.* A thermally robust $\text{La}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}\text{:Ce}$ -in-glass film for high-brightness blue-laser-driven solid state lighting [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2019, 13(2): 1800216.
- [61] DING Y J, YU Z K, WANG Q, *et al.* Highly heat-dissipating phosphor-in-glass film converter for high-luminance laser lighting [J]. *Ceram. Int.*, 2024, 50(7): 10609-10617.
- [62] YU Z K, ZHAO J Z, YANG Z Z, *et al.* A novel PiGF@diamond color converter with a record thermal conductivity for laser-driven projection display [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(39): 2406147.
- [63] JIN L, LIU S T, ZHANG H R, *et al.* High thermal conductivity BN substrate YAG:Ce^{3+} phosphor glass films for a laser-driven lighting device [J]. *ACS Appl. Opt. Mater.*, 2024, 2(11): 2350-2358.
- [64] ZHANG H J, ZHAO J Z, YU Z K, *et al.* A novel $\text{Sapphire@PiGF@Sapphire}$ color converter with high luminescence saturation threshold for laser lighting [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(4): 2414023.
- [65] MOU Y, PENG Y, WANG X Z, *et al.* Unique sandwich and microstructure design of phosphor-in-glass film for high brightness laser-driven white lighting [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2024, 44(4): 2408-2417.
- [66] CHEN L, LIN C C, YE H C W, *et al.* Light converting inorganic phosphors for white light-emitting diodes [J]. *Materials*, 2010, 3(3): 2172-2195.
- [67] XIA Z G, XU Z H, CHEN M Y, *et al.* Recent developments in the new inorganic solid-state LED phosphors [J]. *Dalton Trans.*, 2016, 45(28): 11214-11232.
- [68] SUN B H, ZHANG L, HUANG G C, *et al.* Surface texture induced light extraction of novel Ce:YAG ceramic tubes for outdoor lighting [J]. *J. Mater. Sci.*, 2019, 54(1): 159-171.
- [69] SUN B H, ZHANG L, HUANG G C, *et al.* Fabrication, optical and luminescence properties of low pressure injection molded YAG:Ce tubular ceramics for outdoor lighting [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2021, 41(2): 1564-1571.
- [70] CHEN X, LIU M Y, ZHOU C M, *et al.* High luminous efficiency and excellent thermal performance in rod-shaped YAG:Ce phosphor ceramics for laser lighting [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(2): 1465-1477.
- [71] ZHU L, ZHANG L, LIU M Y, *et al.* A novel batch-scale fabrication method for hundred-micron YAG transparent ceramic fibers [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2023, 43(13): 5616-5625.
- [72] DE BOER D K G, BRULS D, HOELEN C, *et al.* High lumen density sources based on LED-pumped phosphor rods: opportunities for performance improvement [C]. *Proceedings of SPIE 10378, Sixteenth International Conference on Solid State Lighting and LED-based Illumination Systems, San Diego, USA, 2017: 103780M.*
- [73] HU S, LIU Y L, ZHANG Y L, *et al.* 3D printed ceramic phosphor and the photoluminescence property under blue laser excitation [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2019, 39(8): 2731-2738.
- [74] LI B N, WANG S P, CHEN J C, *et al.* 3D printing of LuAG:Ce transparent ceramics for laser-driven lighting [J]. *Ceram. Int.*, 2023, 49(23): 38708-38716.
- [75] KANG J, LIU X C, LIU Z T, *et al.* Rod-shaped LuAG:Ce transparent ceramic enabling ultrahigh forward efficiency for laser lighting in a transmissive mode [J]. *Opt. Lett.*, 2024, 49(20): 5933-5936.
- [76] TIAN J J, LIU H M, GUO R, *et al.* Large size lenticular shaped phosphors-in-glass by Isobam-APS gel casting to act for converting and condensing in LCD projector [J]. *Ceram. Int.*, 2023, 49(5): 7753-7760.
- [77] WANG B, WANG Y, YANG L, *et al.* Various shaped phosphors-in-glass lenses by Isobam-APS gel casting for white light emitting diodes [C]. *Proceedings of 2024 25th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Tianjin, China, 2024: 01-05.*
- [78] 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)
- [79] COZZAN C, LHEUREUX G, O'DEA N, *et al.* Stable, heat-conducting phosphor composites for high-power laser lighting [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(6): 5673-5681.
- [80] LIU Z H, LI S X, HUANG Y H, *et al.* The effect of the porosity on the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG:Ce}$ phosphor ceramic: microstructure,

- luminescent efficiency, and luminous stability in laser-driven lighting [J]. *J. Alloy. Compd.*, 2019, 785: 125-130.
- [81] WANG J C, TANG X Y, ZHENG P, *et al.* Thermally self-managing YAG:Ce-Al₂O₃ color converters enabling high-brightness laser-driven solid state lighting in a transmissive configuration [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(13): 3901-3908.
- [82] WANG Y B, HUANG X Y, CHENG Z Q, *et al.* Al₂O₃-Ce:YAG composite phosphor ceramics for white laser lighting: novel preparation and regulatable properties [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2023, 106(10): 5933-5943.
- [83] CHENG Z Q, LIU X, CHEN X R, *et al.* Composition and luminescence properties of highly robust green-emitting LuAG:Ce/Al₂O₃ composite phosphor ceramics for high-power solid-state lighting [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2023, 12(3): 625-633.
- [84] SHEN Z T, ZHU Q Q, TIAN R D, *et al.* Investigation of excitation modes in Al₂O₃-YAG phosphor ceramics for high-power laser-driven lighting [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2024, 13(4): 046002.
- [85] LIU X, QIAN X L, HU Z W, *et al.* Al₂O₃-Ce:GdYAG composite ceramic phosphors for high-power white light-emitting diode applications [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2019, 39(6): 2149-2154.
- [86] LI X Y, CHEN J, LIU Z G, *et al.* (Ce,Gd):YAG-Al₂O₃ composite ceramics for high-brightness yellow light-emitting diode applications [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2022, 42(3): 1121-1131.
- [87] FU J, ZHANG Y, FENG S W, *et al.* Elaboration of Ce:(Lu,Gd)₃Al₅O₁₂-Al₂O₃ transparent nanoceramics through full glass crystallization for high-power white LED/LD lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(46): 16186-16194.
- [88] ZHAO H Y, XU J, LI J S, *et al.* Fabrication of Al₂O₃-GAGG:Ce composite ceramic phosphors with excellent color quality for high-power laser-driven lighting [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2024, 44(1): 373-382.
- [89] ZHAO H Y, YU H Q, XU J, *et al.* Novel high-thermal-conductivity composite ceramic phosphors for high-brightness laser-driven lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(32): 10487-10496.
- [90] 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.
- [91] CHEN L, MA Z Z, CHEN J, *et al.* MgF₂-doped MgO-YAG:Ce composite ceramics prepared by pressureless vacuum sintering for laser-driven lighting [J]. *J. Lumin.*, 2024, 266: 120301.
- [92] WANG Y B, CHENG Z Q, YE J H, *et al.* Fabrication and luminous properties of BaAl₂O₄-LuAG:Ce composite phosphor ceramics for solid-state laser lighting [J]. *Opt. Mater.*, 2024, 154: 115715.
- [93] FUJIOKA K, YAGASAKI K, SAWADA T, *et al.* AlN-Ce-doped yttrium aluminum garnet composite ceramic phosphor for high-power laser lighting [J]. *Opt. Mater.*, 2021, 121: 111507.
- [94] ZHANG Y L, HU S, WANG Z J, *et al.* Pore-existing Lu₃Al₅O₁₂:Ce ceramic phosphor: an efficient green color converter for laser light source [J]. *J. Lumin.*, 2018, 197: 331-334.
- [95] CHENG Z Q, WANG Y B, LI W Y, *et al.* Porous Ce:YAG ceramics with controllable microstructure for high-brightness laser lighting [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2023, 106(5): 2903-2910.
- [96] JIN L, LIU S T, SI S C, *et al.* Targeting cooling for YAG:Ce³⁺-based laser-driven lighting device by blending high thermal conductivity AlN in phosphor-sapphire composite [J]. *Ceram. Int.*, 2022, 48(23): 34760-34768.
- [97] HUANG M H, ZHU Q Q, LI S X, *et al.* Thermally robust Al₂O₃-La₃Si₆N₁₁:Ce³⁺ composite phosphor-in-glass (PiG) films for high-power and high-brightness laser-driven lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(2): 488-496.
- [98] WANG L H, LIU J W, XU L, *et al.* Realizing high-power laser lighting: artfully importing micrometer BN into Ce:GdYAG phosphor-in-glass film [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(2): 2200585.
- [99] LIU B G, PANG S Q, CHEN X R, *et al.* Pore-existing phosphor-in-glass film realizing ultra-efficient and uniform laser lighting [J]. *J. Lumin.*, 2024, 266: 120337.
- [100] MA Y L, SHAO C Y, WU L, *et al.* Cr³⁺ activated Gd₃Sc₂Al₃O₁₂ garnet phosphor ceramic with broadband emissions and enhanced thermal stability toward high-power near-infrared LED/LD [J]. *Ceram. Int.*, 2024, 50(15): 26624-26633.
- [101] YAO Q, ZHANG L, ZHANG J, *et al.* Simple mass-preparation and enhanced thermal performance of Ce:YAG transparent ceramics for high power white LEDs [J]. *Ceram. Int.*, 2019, 45(5): 6356-6362.
- [102] MA Y L, LI X C, WU L, *et al.* Preparation of (Lu,Y)₃(Al,Sc,Cr)₂Al₃O₁₂ phosphor ceramics with high thermal stability for near-infrared LED/LD [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2024, 13(3): 354-363.
- [103] MA Y L, WANG Z D, PANG T, *et al.* A cyan-green-emitting garnet-structured Lu_{3-x}Sc_xAl_{2-y}Sc_yAl_{3-z}Sc_zO₁₂:Ce³⁺ phosphor ceramics towards high-color-quality laser-driven lighting [J]. *Ceram. Int.*, 2024, 50(12): 21074-21082.
- [104] LEE J S, ARUNKUMAR P, KIM S, *et al.* Smart design to resolve spectral overlapping of phosphor-in-glass for

- high-powered remote-type white light-emitting devices [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(4): 762-765.
- [105] KIM J K, LUO H, SCHUBERT E F, *et al.* Strongly enhanced phosphor efficiency in GaInN white light-emitting diodes using remote phosphor configuration and diffuse reflector cup [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, 44(5L): L649.
- [106] MA Y L, LI X C, WU L, *et al.* Efficient thermal and luminescent regulations of LuAG:Ce-PiG based remote LED/LD [J]. *Ceram. Int.*, 2024, 50(3): 4831-4840.
- [107] HU P, LIU Y F, SUN P, *et al.* Tunable YAG:Ce³⁺ ceramic phosphors for white laser-diode lighting in transmissive/reflective models [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2021, 140: 111297.
- [108] KANG J, ZHANG L, LI Y B, *et al.* Luminescence declining behaviors in YAG:Ce transparent ceramics for high power laser lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(45): 14357-14365.
- [109] 陈鑫溶, 刘丙国, 徐坚. 面向器件化的激光照明用荧光材料设计——简评与展望 [J]. *发光学报*, 2023, 44(5): 759-770.
- CHEN X R, LIU B G, XU J. Application-oriented design of phosphors for laser lighting——mini review and outlook [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(5): 759-770. (in Chinese)
- [110] MOU Y, WANG Q, GUO Z Y, *et al.* Nitride phosphor-in-glass films enabling high-performance white light in transmissive and reflective laser lighting [J]. *Ceram. Int.*, 2023, 49(8): 11821-11828.
- [111] 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 Photonics Rev.*, 2019, 13(10): 1900147.
- [112] 黑玲丽, 李淑星, 程璇. 光斑调控对激光荧光材料性能评价的影响 [J]. *发光学报*, 2021, 42(10): 1646-1652.
- HE L L, LI S X, CHENG X. Effect of laser spot regulation on evaluation of laser phosphors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(10): 1646-1652. (in Chinese)
- [113] XU J, JIANG Z, GU W, *et al.* Design of a β -SiAlON:Eu based phosphor-in-glass film with high saturation threshold for high-luminance laser-driven backlighting [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 119(23): 231102.
- [114] YUAN S D, BITZILLOU I, CHEN X R, *et al.* Novel strategy to optimize luminance for phosphor-converted laser lighting [J]. *J. Lumin.*, 2024, 265: 120233.
- [115] RAHMAN F. Diode laser-excited phosphor-converted light sources: a review [J]. *Opt. Eng.*, 2022, 61(6): 060901.
- [116] LI X D, LI Y, WANG L C, *et al.* Measuring spot sizes of laser-excited phosphor ceramics with a goniophotometer [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2024, 35(19): 1364.
- [117] KRASNOSHCHOKA A, HANSEN A K, THORSETH A, *et al.* Phosphor material dependent spot size limitations in laser lighting [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(4): 5758-5767.
- [118] XU J, WANG L J, GU W, *et al.* Emitting area limitation via scattering control in phosphor film realizing high-luminance laser lighting [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2022, 42(2): 608-615.



齐星宇(2000-),男,江苏徐州人,硕士研究生,2023年于淮阴工学院获得学士学位,主要从事激光照明用复合结构荧光材料的研究。
E-mail: qqixingyu@163.com



马跃龙(1988-),男,河南开封人,博士,副教授,2021年于江苏大学获得博士学位,主要从事光功能陶瓷/玻璃及其器件研发、粮食智能光电检测技术的研究。
E-mail: uhgdmyl@haut.edu.cn



吴兰(1981-),女,河南新乡人,博士,教授,博士生导师,2009年于西安理工大学和中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所获得博士学位,主要从事智能粮机制造、智能感知和陶瓷基粮食检测器件研发。
E-mail: wulan@haut.edu.cn