



YAG:Ce³⁺在激光照明应用中的研究进展

胡盼, 丁慧, 刘永福, 孙鹏, 刘泽华, 罗朝华, 黄政仁, 江浩川, 蒋俊

引用本文:

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 Pan, DING Hui, LIU Yong-fu, et al. Recent Progress of YAG:Ce³⁺ for White Laser Diode Lighting Application[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(12): 1504–1528.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200249>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于荧光玻璃的高效LED白光技术

High-efficiency Technology of LED White Light Based on Phosphor Glass

发光学报. 2016, 37(6): 637–643 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163706.0637>

共沉淀法制备暖白光LED用Na₂TiF₆:Mn⁴⁺红色荧光粉及其发光性能研究

Co-precipitation Synthesis and Luminescence Properties of Na₂ TiF₆:Mn⁴⁺ Red Phosphors for Warm White Light Emitting Diodes

发光学报. 2015(12): 1402–1408 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153612.1402>

基于YAG:Ce³⁺荧光粉复合Eu³⁺掺杂荧光玻璃的激光照明器件

Laser Lighting Device Based on YAG:Ce³⁺ Phosphor Composite Eu³⁺ Doped Phosphor-in-glasses

发光学报. 2019, 40(7): 842–848 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194007.0842>

亚微米级Ca_{2.40}Lu_{0.54}ScMgSi₃O₁₂:0.06Ce³⁺荧光粉的溶胶燃烧法合成与表征

Sol-combustion Synthesis and Analysis of Submicron Sized Ca_{2.40}Lu_{0.54}ScMgSi₃O₁₂:0.06Ce³⁺ Phosphor for White Light Emitting Diodes

发光学报. 2014, 35(1): 73–78 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143501.0073>

一种新型的白光LED用绿色荧光粉Ca₈MgLu(PO₄)₇:Tb³⁺

A Novel Green Phosphor Ca₈ MgLu(PO₄)₇:Tb³⁺ for Near Ultraviolet White Light-emitting Diodes

发光学报. 2015(10): 1132–1136 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153610.1132>

文章编号: 1000-7032(2020)12-1504-25

YAG: Ce³⁺在激光照明应用中的研究进展

胡 盼^{1,2}, 丁 慧^{1,2}, 刘永福^{1*}, 孙 鹏¹, 刘泽华^{1*},
罗朝华¹, 黄政仁¹, 江浩川¹, 蒋 俊^{1*}

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于激光二极管(Laser diode, LD)的照明和显示技术代表了半导体行业未来的重要发展方向之一, 荧光转换材料是决定激光照明的能量效率和显示产品色彩品质的核心部件。黄色荧光转换材料 Y₃Al₅O₁₂: Ce³⁺ (YAG: Ce³⁺) 适合蓝光 LD 激发、效率高、易于获得白光, 仍然是目前最为广泛的研究对象。传统荧光粉加有机硅胶的封装模式热导率低, LD 激发下存在烧蚀、发黑、失效等问题。LD 高功率激发密度的特点引发了荧光材料封装技术革命性变革。为此, 多形态、高热导率的远程荧光体应运而生。本综述主要对基于 YAG: Ce³⁺ 荧光玻璃、荧光薄膜、荧光晶体、荧光陶瓷等不同形态材料的制备方法及其在 LD 照明应用中的性能研究进行了总结, 对荧光转换材料和 LD 照明的发展进行了展望。

关键词: YAG: Ce³⁺; 荧光陶瓷; 荧光玻璃; 荧光薄膜; 激光照明

中图分类号: TN365

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200249

Recent Progress of YAG: Ce³⁺ for White Laser Diode Lighting Application

HU Pan^{1,2}, DING Hui^{1,2}, LIU Yong-fu^{1*}, SUN Peng¹, LIU Ze-hua^{1*}, LUO Zhao-hua¹,
HUANG Zheng-ren¹, JIANG Hao-chuan¹, JIANG Jun^{1*}

(1. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Authors, E-mail: liuyongfu@nimte.ac.cn; liuzehua@nimte.ac.cn; jjun@nimte.ac.cn

Abstract: Laser diode(LD) is regarded as the next-generation solid-state lighting. Color converters are the key luminescent materials in determining white light quality in LD lighting. The yellow-emitting Y₃Al₅O₁₂: Ce³⁺ (YAG: Ce³⁺) is extensively researched in LD lighting. To mitigate the thermal effect induced by the high-power density of blue LDs, remote encapsulations of phosphor in glasses/film, single-crystal phosphors, (transparent) ceramic phosphors are proposed. This paper reviews and summaries recent progress of YAG: Ce³⁺ for LD lighting application and looks forward to its future development.

Key words: YAG: Ce³⁺; ceramic phosphors; phosphor in glass; phosphor film; white laser diode lighting

收稿日期: 2020-08-20; 修订日期: 2020-09-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0104502, 2017YFC0111602); 国家自然科学基金(51677286); 中科院福建创新研究院(FJCXY18040203); 浙江省公益技术项目(LGG18E020007); 内蒙古自治区科技计划(2019GG263); 宁波市自然科学基金(2019A610062)资助项目

Supported by National Key Research and Development Program of China(2016YFC0104502, 2017YFC0111602); National Natural Science Foundation of China(51677286); Fujian Institute of Innovation, Chinese Academy of Sciences(FJCXY18040203); Public Projects of Zhejiang Province(LGG18E020007); Science and Technology Plan of The Inner Mongolia Autonomous Region(2019GG263); Ningbo Municipal Natural Science Foundation(2019A610062)

1 引言

基于LED芯片的半导体照明和显示技术经过长期发展,已经广泛应用于各种照明和显示领域^[1-21]。相较而言,激光二极管(Laser diode, LD)在较小的体积下,易获得更高的亮度,大功率驱动时的电光转换效率更高^[22-30]。因此,基于LD的照明和显示技术是未来发展的重要方向。

从1960年第一台红宝石激光器问世^[31],至今已有60年,激光技术在医疗、加工等各领域均取得了较好发展,激光照明技术则刚刚兴起。2005年,日本Nichia公司通过光纤耦合输出激光激发荧光粉实现了白光发射^[32]。2011年,宝马推出i8概念车,远光灯LD照明系统与近光灯LED系统结合,使得汽车大灯的有效照明距离大为提高^[33]。2014年,奥迪推出配备激光大灯的概念车R8 LMX^[34]。随着人们对智能控制、大功率、高亮度等需求的不断提出,LD照明进入了快速发展期。近年来,以汽车大灯为代表的激光照明产品、以激光投影电视为代表的激光显示产品都在逐渐深入人们的生活。

目前,与LED照明器件类似^[35-44],LD照明主要有以下3种实现模式:

(1)直接将红、绿、蓝三基色LD芯片组合或红、绿、蓝、黄四色激光合成得到白光,实现LD照明^[45]。通过调节不同颜色激光的比例实现白光照明,但是激光束能量高,易造成安全问题,而且不同颜色激光器的性能不一样,长时间使用会影响光源质量。

(2)紫外LD芯片激发红、绿、蓝三色荧光体实现LD照明^[46]。通过调节三色荧光体的比例,可获得全光谱波段高品质的白光。但是目前紫外激光器效率相对较低,从紫外激光到白光过程中,斯托克斯位移相对较大,导致照明器件效率更低。

(3)蓝光LD芯片激发黄色荧光体^[47]。蓝光与黄光混合后可直接形成白光,该工艺由单一的蓝光LD芯片和单一的黄色荧光转换材料直接构成,方案最为简单。蓝光LD芯片和黄色荧光转换材料相对最为成熟,各自均有较高的效率,因此,该方案更易获得高效率、高亮度的LD照明器件。

Y₃Al₅O₁₂(YAG)为石榴石结构,属于立方晶系,空间点群为Ia3d,对称性高,空间各向同性。

在一个YAG晶胞中有24个Y³⁺、40个Al³⁺以及96个O²⁻,其中O²⁻离子组成空间结构,其余阳离子占据多面体中心位置,其中Y占据12面体格位;Al占据八面体格位和四面体格位形成[A₂O₄]四面体和[A₂O₆]八面体。每个八面体连接到6个四面体,而每个四面体连接到4个[A₂O₆]八面体。石榴石结构为A₃C₂D₃O₁₂,A、C、D各占据不同的位点,可通过其他离子的取代而调控其晶体场结构,从而调节、优化其性能。因此,YAG:Ce具有优异的光谱可调节性能。

1967年,荷兰飞利浦实验室Blass等首次报道了YAG:Ce的发光性能^[48]。在阴极射线激发下,YAG:Ce的发射光谱覆盖300~700 nm范围,其在550 nm处出现一个宽带发射峰。因此,YAG:Ce可用于阴极射线管,如彩色电视成像。YAG:Ce的主激发峰在460 nm的蓝光区域,能被蓝光有效激发,具有较高的量子效率、良好的热稳定性,与蓝光芯片结合,可直接获得白光。但是其发射光谱以黄光为主,青、绿、红光成分不足,导致白光的显色指数偏低、相关色温偏高。目前,YAG:Ce黄色荧光粉已成为白光LED中最广泛的研究对象和最成熟的商用荧光转换材料^[49-58]。

在LD照明中,LD芯片激发功率密度高,极短的时间内即可达到很高的温度。对于传统的YAG:Ce荧光粉加有机硅胶涂覆的封装模式而言,其热导率较低(0.1~0.4 W·m⁻¹·K⁻¹),LD芯片辐照下有机硅胶快速老化,甚至被激光烧蚀,器件性能急剧下降甚至失效。因此,传统的有机硅胶封装工艺已经无法满足LD照明器件的服役要求,新型封装工艺亟待开发。

在大功率LED照明中,也存在大量高温引起的器件快速老化、性能降低等问题。为此,人们提出具有高热导率(1~15 W·m⁻¹·K⁻¹)的荧光玻璃^[59-77]、荧光薄膜^[78-80]、荧光晶体^[81-84]、荧光陶瓷^[85-105]等远程荧光体封装模式。2015年,福建师范大学陈大钦教授和温州大学向卫东教授等^[64],2018年,中国科学院福建物质结构研究所王元生和林航研究员等^[69],2020年,韩国公州国立大学Chung等^[60]先后详细综述了荧光玻璃等在大功率LED照明中的研究进展。2018年,韩国全南国立大学Im等^[59]综述了块体荧光片在大功率LED中面临的挑战、机遇和应用。这些研究工作为LD照明用荧光体的开发提供了丰富的

经验。

借鉴大功率 LED 器件的研究经验,人们将荧光玻璃、薄膜、晶体、陶瓷等各类荧光载体应用于 LD 照明研究中。2018 年,中国计量大学王乐教授、厦门大学解荣军教授及李淑星博士等详细总结了激光照明用各类荧光转换材料的研究进展^[104]。其中, YAG: Ce 具有适合蓝光激发, 效率高、寿命长等诸多优点。因此, 结合蓝光 LD 芯片, YAG: Ce 荧光转换材料再次成为 LD 照明中的研究热点, 并得到快速的发展。激光辐照时, 随着激光功率增加, 荧光体的发光达到最大值后开始下降, 这种现象通常称为发光饱和效应, 对应的激发功率称为饱和功率, 或者饱和功率密度。饱和功率越高, 荧光转换材料越适合大功率型 LD, 更易获得高亮度照明。 YAG: Ce 为荧光主体, 以玻璃 (Phosphor in glass, PiG)、薄膜 (Film)、晶体 (Single-crystal phosphor, SCP)、透明/陶瓷 (Transparent/ceramic phosphor, TCP/CP) 等多种形式为载体, 在激光照明中被广泛研究。各类荧光体的开发目的均是为了提高荧光转换材料的导热性能, 降低激光引起的发光热猝灭效应, 进而提升饱和功率和发光亮度。而各类远程荧光体因制备工艺不同, 相应的发光特性和激光照明中的应用也各有特点。

因此, 本文综述了近年来以 YAG: Ce 为主体, 以玻璃、薄膜、晶体、陶瓷为载体的各类远程荧光体的制备工艺及其在激光照明应用中的研究进展。通过本综述, 可较为直观地了解激光照明对材料性能的需求及其在器件上的发展应用等。

2 YAG: Ce³⁺ 荧光体

2.1 YAG: Ce³⁺ 荧光玻璃体 (YAG: Ce³⁺-PiG)

将 YAG: Ce³⁺ 荧光粉按一定比例分散在玻璃基质中是目前荧光玻璃体的主要制备方法^[103-116]。2017 年, 中山大学王静等^[106]采用熔融淬火法, 将 30SiO₂-6Al₂O₃-22B₂O₃-30ZnO-12BaO 玻璃前驱粉在 1 400 °C 熔融冷却后制备成玻璃粉, 然后与商用 YAG: Ce³⁺ 荧光粉混合, 冷等成型后经 700 °C 再烧结, 制备成荧光玻璃, 如图 1(a)。随着 YAG: Ce³⁺ 荧光粉比例增加, 玻璃颜色逐渐加深, 透明度逐渐下降, 如图 1(b)。该荧光玻璃的热导率约为 0.59 W · m⁻¹ · K⁻¹。与 455 nm 激光器结合, 如图 2, 在 1 A 电流驱动下, 5% YAG: Ce³⁺ 荧光玻璃获得白光的色坐标为 (0.329, 0.333), 相关色

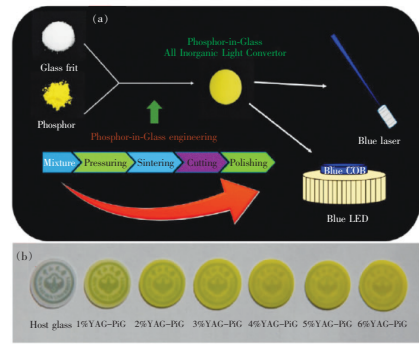


图 1 (a) 荧光玻璃制备流程示意图; (b) $x\%$ YAG ($x = 0 \sim 6$) 荧光玻璃实物图^[106]。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the processes of PiG engineering and the potential applications in illumination devices. (b) Photos of $x\%$ YAG-PiG ($x = 0 - 6$)^[106].

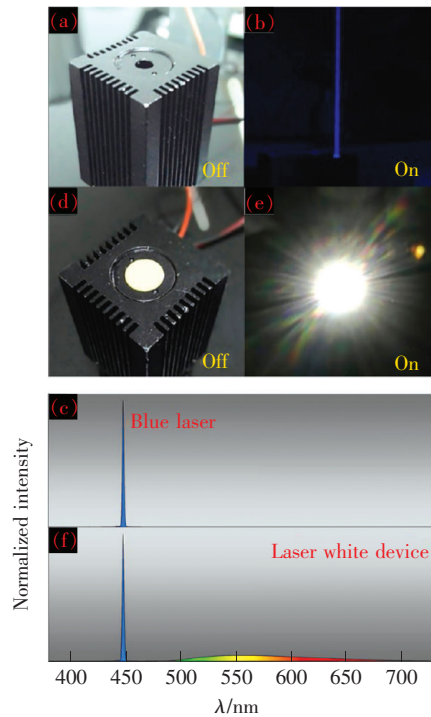


图 2 (a) ~ (b) 蓝色激光器; (c) 蓝光 LD 电致发光谱; (d) ~ (e) 荧光玻璃复合的激光照明器件; (f) 复合白光 LD 电致发光谱^[106]。

Fig. 2 (a) - (b) Photographs of blue LDs. (c) Normalized EL spectra of blue LDs. (d) - (e) Prototype white LDs combing blue LDs and 5% YAG-PiG out operation and in operation. (f) Normalized EL spectra of prototype white LDs^[106].

温 5 649 K, 流明效率 110 lm · W⁻¹。

2018 年, 王静教授等^[107]通过类似的工艺制备了与 YAG 晶体折射率 (1.84) 相同的 Sb₂O₃-B₂O₃-ZnO-K₂O 荧光玻璃 (折射率 1.84)。其以石

英玻璃为热沉, 制备成激光照明器件。445 nm 蓝色激光通过透镜聚光后激发荧光玻璃, 实现透射复合发光。激光功率从 0.5 W 增加到 5 W 时, 光通量由 51.2 lm 增加到 467 lm, 流明效率从 102.4 lm · W⁻¹ 下降到 93.4 lm · W⁻¹。

2019 年, 王静教授等^[108] 选择折射率 1.56、热导率 0.89 W · m⁻¹ · K⁻¹ 的 55SiO₂-20Na₂O-20ZnO-5CaO 基荧光玻璃, 与 445 nm 蓝色激光器复合制备照明器件, 如图 3(a)。3.3 mm² 激光光斑辐照下, 其荧光饱和功率为 1.3 W, 对应的饱和功率密

度为 0.39 W · mm⁻², 光通量约为 110 lm, 流明效率约为 85 lm · W⁻¹, 如图 3(b)。

将上述荧光玻璃与蓝宝石片复合(蓝光透过, 黄光反射, 厚度 0.3 mm, 热导率 30 W · m⁻¹ · K⁻¹), 荧光饱和功率增加至 4 W, 对应的饱和功率密度为 1.21 W · mm⁻², 光通量 689 lm, 流明效率 172 lm · W⁻¹, 分别是纯荧光玻璃的 6 倍和 2 倍。

当激光功率固定在 3 W、持续工作 1 800 s 时, 流明效率稳定在 217 lm · W⁻¹, 显色指数 57, 色温 3 650 K, 色坐标(0.43, 0.49), 如图 3(c)。

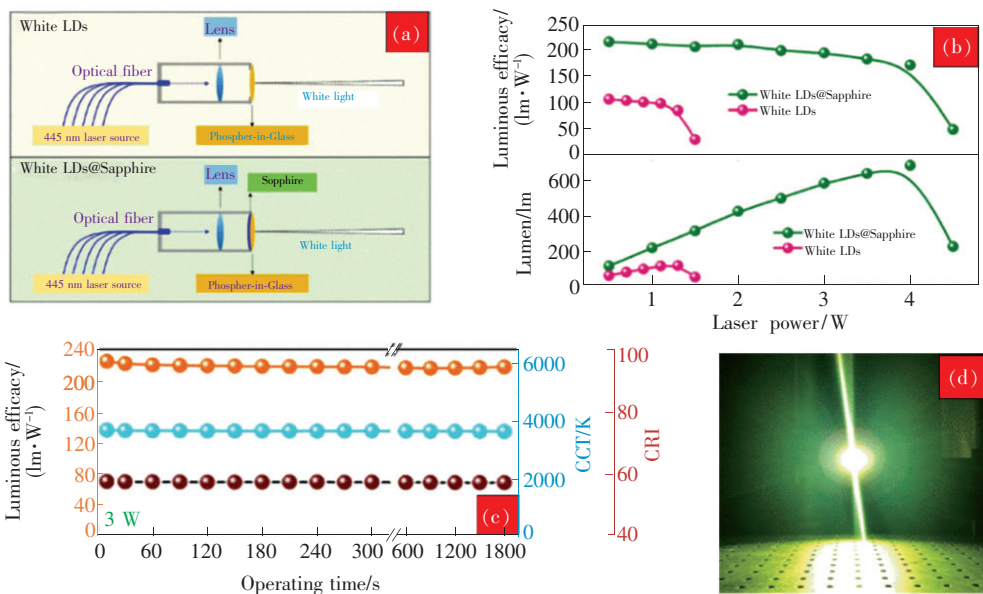


图 3 (a)有、无蓝宝石的激光照明器件结构示意图;(b)光通量、流明效率的功率依赖关系;(c)3 W 功率下,以荧光玻璃和蓝宝石制备的激光照明器件的流明效率、相关色温、显色指数随时间的变化;(d)激光照明器件点亮照片^[108]。
Fig. 3 (a)Schematic diagram of the white LD and the white LD@sapphire devices. (b)Luminous flux and luminous efficacy of white LDs with and without the sapphire plate. (c)Luminous efficacy, CCT, and CRI of the white LD@sapphire under a laser power of 3 W over time. (d)Photographs of the white LD@sapphire when the power on^[108].

荧光玻璃及其与高热导率热沉复合, 可进一步降低激光引起的热效应, 结合选择性镀膜技术可提升激光照明器件亮度和效率。

YAG: Ce³⁺ 与有机硅胶复合的传统荧光胶膜热导率低(0.18 W · m⁻¹ · K⁻¹), 激光辐照后易烧蚀、碳化发黑, 无法服役于激光照明^[107-108]。如图 4 所示, 10% YAG 的荧光胶膜, 激光功率密度从 0.12 W · mm⁻² 增加到 0.29 W · mm⁻², 其温度上升到 761.8 °C, 烧坏碳化。相同比例的荧光玻璃热导率高(0.89 W · m⁻¹ · K⁻¹), 温度仅为 89.5 °C, 其可耐受 0.87 W · mm⁻² (2.85 W) 的激光功率密度, 此时温度为 428.2 °C, 如图 4(b)。

2020 年, 浙江大学邱建荣教授团队^[109] 通过无压烧结和 3D 打印技术, 制备出了全无机 YAG: Ce-PiSG。将纳米级非晶态 SiO₂ 与能被 UV 固化的有机物混合, YAG: Ce 粉末与上述混合物球磨混合均匀, 形成悬浮液, 将悬浮液倒入模具, 在 365 nm 紫外光照射下聚合成型, 脱胶, 1 250 °C 还原气氛(5% H₂ + 95% N₂) 中烧结 3 h, 如图 5(a) 所示。无压烧结可以保持样品原有形状, 与 3D 打印结合后能制备形状复杂的样品, 如图 5(b) 所示。5% YAG: Ce-PiSG 的内量子效率达到 95%, 250 °C 时热导率为 1.93 W · m⁻¹ · K⁻¹。445 nm 蓝光激发下流明饱和功率 3.46 W · mm⁻²。

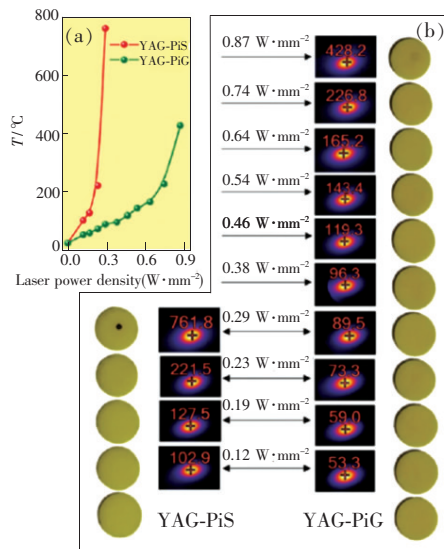


图 4 (a) ~ (b) 10% YAG 荧光胶膜、荧光玻璃的照片、红外热成像和温度与激光功率的依赖关系^[108]。

Fig. 4 (a) - (b) Photographs, thermal infrared images and temperatures of the 10% YAG-PiS and the 10% YAG-PiG samples at different laser power densities^[108].

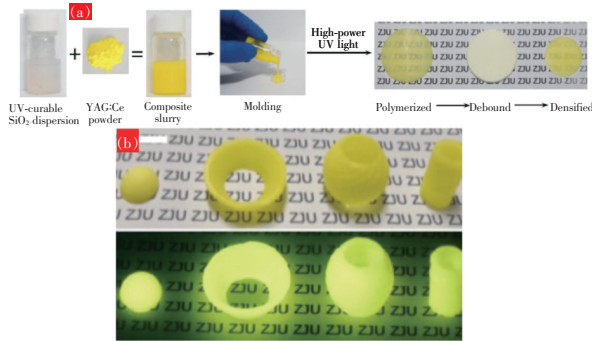


图 5 (a) YAG: Ce-PiSG 的制备过程; (b) 3D 打印烧结后的 3% YAG: Ce-PiSG 样品^[109]。

Fig. 5 (a) Synthesis process of YAG: Ce-PiSG. (b) Examples of printed and sintered 3% YAG: Ce-PiSG^[109].

2.2 YAG: Ce³⁺ 荧光玻璃薄膜

YAG: Ce³⁺ 块体荧光玻璃相对荧光胶膜, 其较高的导热性能避免了激光辐照引起的荧光体烧蚀发黑。为了进一步降低激光引起的热效应, 提升荧光体的发光性能, 人们提出 YAG: Ce³⁺ 荧光玻璃薄膜 (YAG: Ce³⁺-film) 与高导热基板复合的方案。

2.2.1 蓝宝石基板-荧光玻璃膜

2018 年, 河南理工大学徐坚等^[110] 将胶体 SiO₂、YAG: Ce³⁺ 荧光粉与 PVP 按照 1:2:0.1 质量比, 在 65 °C 下搅拌混合均匀成粘性胶体。以 1 200 r/min 转速在蓝宝石基板上旋涂 30 s, 65 °C

真空烘箱烘干, 500 °C 马弗炉进行烧结, 最后形成 YAG: Ce/SiO₂ 复合薄膜, 如图 6(a)。在 85 °C/85% 湿度老化 1 000 h, 光衰 5% 以内, 优于纯 YAG 粉体的 8.5%。从图 6(b) 中的 SEM 图可以看到薄膜与基板清晰的界限, 膜厚 50 μm 时发光性能最佳, 激光功率密度达到 20 W · mm⁻² 时仍未出现明显的发光饱和, 如图 6(c)。

2018 年, 厦门大学解荣军教授课题组^[111] 选择 B₂O₃-SiO₂-Al₂O₃-BaO-ZnO 玻璃 (转变温度 585 °C, 软化点 730 °C, 折射率 1.62, 密度 3.1 g · cm⁻³), YAG: Ce³⁺、Ca-α-SiAlON: Eu²⁺ 橙色荧光粉混合制备成印刷膏后, 涂敷在蓝宝石 (10 mm × 10 mm × 0.3 mm) 衬底上, 800 °C 烧结获得薄膜, 如图 7(a)。特别地, 他们对蓝宝石激光入射面镀一维光子晶体减反膜 (厚约 700 nm), 蓝光透过率从 86% 增加至约 92%; 激光出射面镀蓝光增透膜, 透过率提升至约 97%, 黄光反射率约 99%, 如图 7(b)。

通过特殊结构, 在 450 nm 激光 (光斑 0.785 mm²) 下, YAG 的饱和功率为 8.77 W, 光通量为 1 839 lm, 对应饱和功率密度 11.2 W · mm⁻², 流明效率 210 lm · W⁻¹, 显色指数 68。在 YAG 玻璃胶膜再加一层 (Sr, Ca) AlSiN₃: Eu²⁺ 有机硅胶膜后, 如图 7(c), 饱和功率密度降低至 7.8 W · mm⁻², 对应流明效率为 205 lm · W⁻¹, 光通量 1 259 lm, 显色指数提升至 74。

2019 年, 陈明祥、罗小兵教授等^[112] 提出了双面蓝宝石结构。选择 25B₂O₃-10SiO₂-35ZnO-6Li₂O-12La₂O₃-12WO₃ 硼硅酸盐玻璃 (折射率 1.82), 采用熔融淬火法 1 250 °C 熔融, 冷却研磨成玻璃粉。与 30% YAG: Ce³⁺ 荧光粉、有机物混合制成印刷膏, 印刷在单晶蓝宝石基板上 (直径 18 mm, 厚度 0.5 mm, 可见光透过率 > 85%, 折射率 1.77), 上面再覆盖一层蓝宝石单晶板, 经 575 °C 烧结、300 °C 退火后, 制备成荧光玻璃膜 (Phosphor-sapphire composite, PSC), 如图 8(a)。

该硼硅酸盐玻璃膨胀系数 ($8.1 \times 10^{-6} K^{-1}$) 与蓝宝石 ($7.5 \times 10^{-6} K^{-1}$) 接近, 降低了荧光玻璃膜与蓝宝石受热分层的可能性。膜厚 136 μm, 450 nm 蓝色激光 2.53 W 辐照, 流明效率 26.5 lm · W⁻¹, 色温 6 230 K, 显色指数 62.5。当激光功率从 0.75 W 增加到 5.6 W 时, 温度仅从 24 °C 上升到 33 °C。进一步对比发现, 如图 7(b), 4.5 W 功

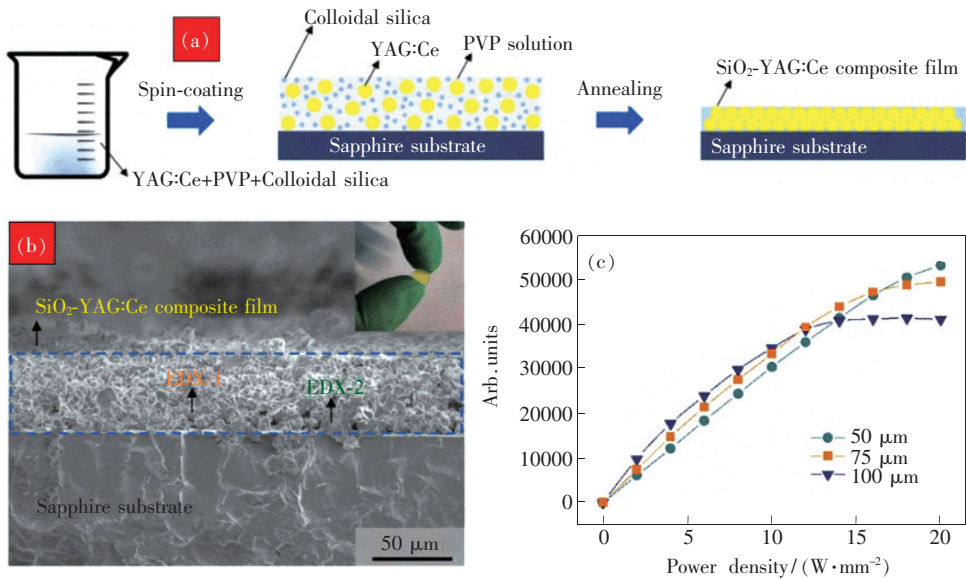


图 6 蓝宝石基板 YAG: Ce/SiO₂ 荧光玻璃膜制备流程 (a) 与截面 SEM 照片 (b); (c) 不同膜厚的荧光饱和特性^[110]。
 Fig. 6 (a) Schematic diagram depicting the fabrication of the SiO₂-YAG: Ce film. (b) Cross-sectional SEM image of the SiO₂-YAG: Ce, inset is the photograph of the SiO₂-YAG: Ce film. (c) Luminescence saturation evaluation as a function of power densities corresponding to different thicknesses of CTF^[110].

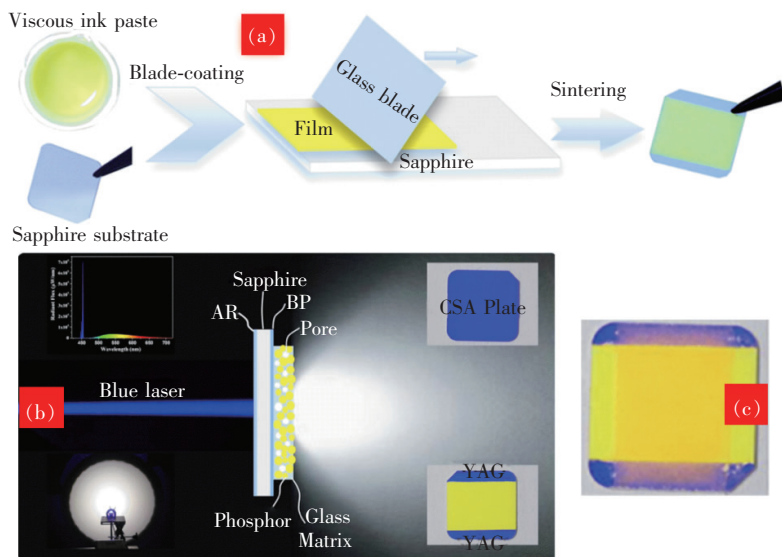


图 7 (a) 蓝宝石基板荧光玻璃膜制备流程; (b) 一维光子晶体结构截面和透射式激光照明示意图; (c) YAG + (Sr, Ca) AlSiN₃: Eu²⁺ -PiS^[111]。
 Fig. 7 (a) Fabrication schematic of the PiG-on-SA plate. (b) Cross sections and schematic of the transmissive configuration for laser-driven white light. (c) SCASN-PiS-on-CSA plates^[111].

率辐照 60 s, 双层蓝宝石基板温度为 32.5 ~ 32.7 °C, 而传统的玻璃基板温度为 125 ~ 157 °C, 如图 8(b)。蓝宝石高的热导率使得热量快速散发至空气中, 有效降低了温度。

在上述基础上, 2019 年, 陈明祥教授等^[113] 选择相同组分的硼硅酸盐玻璃和相同规格的蓝宝石基板, 制备了单层 50% YAG: Ce³⁺ 荧光玻璃膜, 室

温热导率 20.8 W·m⁻¹·K⁻¹ (200 °C 时, 热导率 10.0 W·m⁻¹·K⁻¹)。进一步引入红色荧光粉, 制备成膜厚 75 μm 的 50% YAG: Ce³⁺-5% CASN: Eu²⁺ 荧光玻璃膜, 在 2.35 W 蓝色激光下, 其显色指数提升至 71.1, 色温 4 847, 色坐标 (0.348 7, 0.348 1) 接近黑体辐射曲线, 如图 9。

2020 年, 中科院长春光机所张家骅研究员课

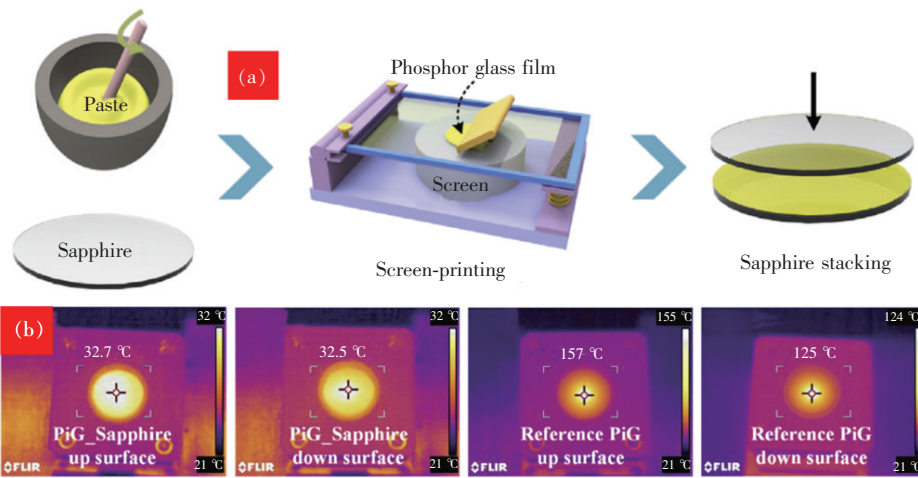


图 8 (a) 双面蓝宝石基板荧光玻璃膜制备流程示意图; (b) 4.5 W 功率激光辐照 60 s 后蓝宝石基板和传统玻璃基板上表面温度^[112]。

Fig. 8 (a) Preparation process of PiG sapphire. (b) Thermal infrared images of PiG sapphire and reference PiG at 4.5 W after 60 s^[112].

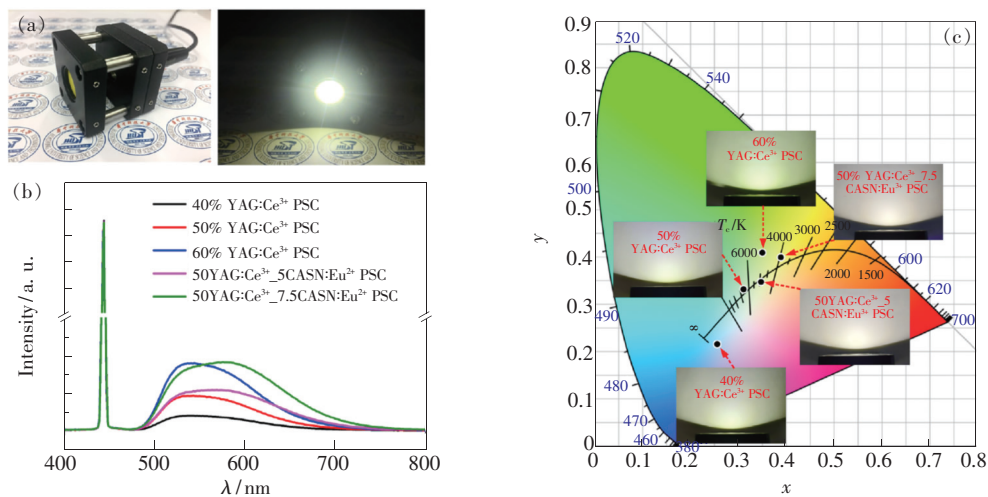


图 9 (a) PSC 蓝宝石基板荧光玻璃膜制备的激光照明器件; (b) 2.53 W 功率下器件的电致发光谱; (c) CIE 色坐标^[113]。

Fig. 9 (a) Pictures of white LDs out operation and in operation. EL spectra (b) and CIE chromaticity coordinates (c) of white LDs under 2.53 W laser excitation. The inset presents the PSC-based white LDs in operation^[113].

题组^[114]在蓝宝石基板上,按照荧光粉:PVP:胶体二氧化硅质量比3:0.02:1最佳粘度与附着力时混合干燥后,500 °C 下排除有机物制备荧光薄膜。

452 nm 激光下,3.52 W 功率时(光斑 0.26 mm²),YAG-SiO₂ 薄膜(厚度约 135 μm)光通量最大为 905 lm,对应流明效率 234 lm · W⁻¹,饱和功率密度 14.3 W · mm⁻²,色温 4 986 K,显色指数 61,色坐标(0.350 2,0.411 3)。

将 CaAlSiN₃:Eu²⁺ 与 Lu₃Al₅O₁₂:Ce³⁺ (LuAG) 荧光粉按照 1:18、1:15 与 1:12 的比例制备荧光薄膜,452 nm 激光下显色指数可分别提升至 80, 85, 92, 流明效率从 173 lm · W⁻¹ 下降到 137 lm · W⁻¹,如图 10。

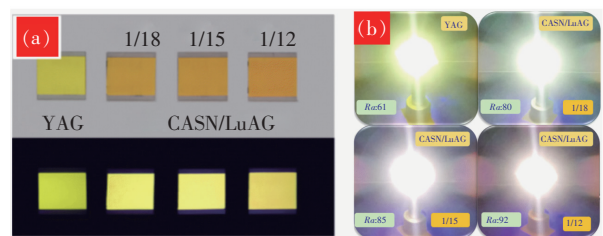


图 10 蓝宝石基板 YAG、CASN、LuAG 荧光玻璃膜样品 (a) 及其在 452 nm 激光下的发光照片 (b)^[114]。

Fig. 10 Photograph of the phosphor-SiO₂ with different content phosphors under day light and blue light (a) and the corresponding lighting photographs (b)^[114].

这些工作证明蓝宝石基板可有效提升散热,降低激光辐照引起的热效应。玻璃胶膜工艺技术

还可实现多种颜色荧光粉的复合, 以此对激光照明中白光显色指数、色温等光学品质进行有效调节。

2.2.2 玻璃基板-荧光玻璃膜

2018 年, 华中科技大学陈明祥、罗小兵教授等^[115] 选择 TeO₂-ZnO-Na₂O-B₂O₃ 玻璃(折射率 1.66~2.03), 采用熔融淬火法 850 °C 熔融、300 °C 冷却退火后, 研磨成玻璃粉。选择商用 YAG: Ce³⁺ 和红色 MFG: Mn⁴⁺ 荧光粉、有机物混合制成印刷膏, 印刷在高透明和高导热、热膨胀系数相近的硼硅酸盐玻璃基板上, 经 450~600 °C 烧结后, 制备成荧光玻璃膜, 如图 11(a)。

印刷 1~6 层 YAG: Ce³⁺, 膜厚从 25 μm 增加

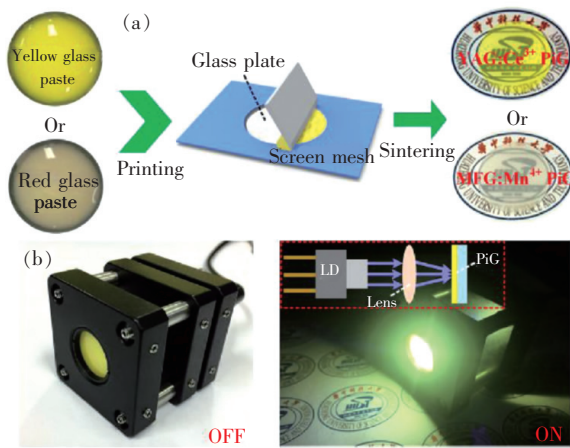


图 11 (a)10% YAG 荧光玻璃膜制备流程示意图; (b) 透射式激光照明器件^[115]。

Fig. 11 (a) Preparation process of PiG converter by screen-printing. (b) Transmissive PiG-based white LD^[115].

至 134 μm, 以此制备成透射式激光照明器件, 如图 11(b)。2.53 W 激光功率下, 出光强度逐渐增强, 流明效率从 13.1 lm · W⁻¹ 增加至 23.8 lm · W⁻¹ (4 层), 然后下降至 21.7 lm · W⁻¹。3~6 层时, 色温从 10 294 降至 4 387, 显色指数从 62.6 降至 58.4。激光功率 5.6 W 时, 荧光薄膜温度为 96.3 °C。

在 3 层 YAG: Ce³⁺ 上印刷 1~4 层 MFG: Mn⁴⁺, 膜厚从 101 μm 增加至 193 μm。2.53 W 激光功率下, 效率 18.7 lm · W⁻¹ 下降至 8.9 lm · W⁻¹, 色温 6 212 K 下降至 4 732 K, 显色指数 67.8 提升至 73.9。

高导热玻璃基板可进一步降低荧光薄膜的温度, 黄、红荧光粉复合, 还可进一步提升激光照明器件的色彩品质。

2019 年, 河南理工大学徐坚等^[116] 通过 YCl₃: CeCl₃: AlCl₃: Al 按照 2.92: 0.08: 4.5: 0.5 分散至去离子水中, 85 °C 下搅拌至 Al 粉完全溶解成胶体, 之后通过 2 200 r/min 转速旋涂 25 s 至石英玻璃基板, 85 °C 烘干, 直至获得相应厚度的薄膜 (4~5 次, 约 1 μm)。还原气氛中 975 °C 烧结形成 YAG: Ce 薄膜, 如图 12(a)。该薄膜比上述 YAG/SiO₂ 薄膜更加致密, 通过调节膜厚, 实现发光可调。采用 446 nm 激光、1.2 W 功率时, 在膜厚 2.4 μm 时, 色温约 5 000 K, 色坐标 (0.353, 0.351) 接近黑体辐射曲线。

该石英玻璃基板制备的 YAG: Ce 薄膜, 在 200 °C 时, 发光强度下降了 18%, 荧光饱和功率为

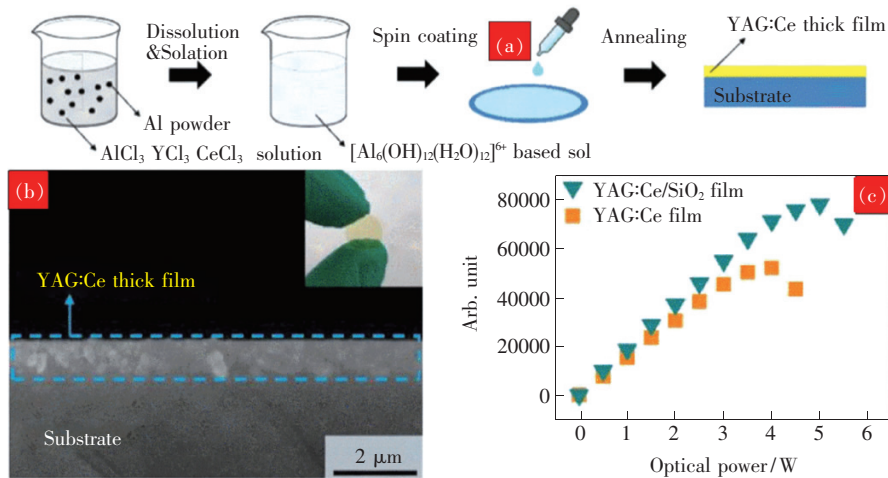


图 12 (a) 石英玻璃板 YAG: Ce 荧光膜制备流程; (b) 截面 SEM 图; (c) YAG: Ce/SiO₂ 荧光玻璃膜的饱和特性^[116]。
Fig. 12 (a) Fabrication schematic. (b) Cross-section. (c) Luminescence saturation for the thick YAG: Ce film (2.4 μm) and the thick YAG: Ce/SiO₂ composite film^[116].

4.1 W。但是其效率低(内效率~81%)和“自加热”效应,导致其性能不如相同材料组分的 YAG: Ce/SiO₂复合玻璃薄膜(内效率~90%,热稳定性下降15%,荧光饱和功率5 W)^[110,116],如图12(c)所示。

2.2.3 铝基板-荧光玻璃膜

2017年,韩国釜庆国立大学 Kwon 等^[117]提出金属 Al 基板-热梯度层-荧光玻璃膜的复合结构(Phosphor-aluminum composite, PAC),如图13(a)。

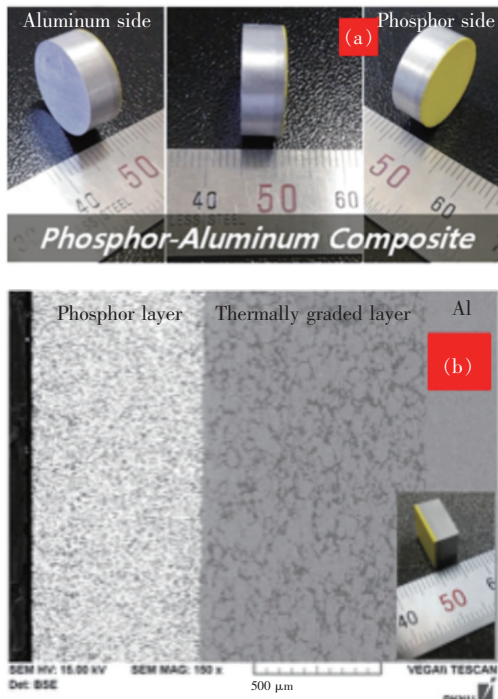


图13 (a)PAC复合结构荧光体;(b)PAC荧光体的SEM截面微观形貌图^[117]。

Fig. 13 (a)Photographs of the as-fabricated PAC. (b)Cross-section SEM image and photo image of the PAC^[117].

Al 基板由 Al 粉烧结而成(4 mm),热梯度层由不同比例的 Al 粉和玻璃粉组成(850 μm),荧光玻璃膜由 50% YAG 和 50% 的玻璃组成(厚度 650 μm),玻璃组分为 B₂O₃-SiO₂-Al₂O₃。

将 Al 粉、Al 粉与玻璃粉混合体、玻璃粉与 YAG 粉混合体依次加入石墨模具中(直径 15 mm),在 SPS 中 550 °C、30 MPa 烧结 1 min,制备 PAC 荧光体。PAC 整体热导率为 31.6 W·m⁻¹·K⁻¹,445 nm 蓝色激光器 4 W 功率辐照 10 min,其表面温度为 137 °C,对应激光光斑 24 mm²,光通量 430 lm。

作者引入热梯度层主要是为了控制热扩散速率,在荧光薄膜层与 Al 金属面之间实现稳定的温差^[117-118],以此在 Al 面结合热电器件,将激光驱动产生的热进一步转化成电(289 mV,77 mA),实现能源的循环利用^[117]。对于激光照明应用,更重要的则是如何降低激光光源引起的热效应。作者的工作则为如何加速散热提供了启发。

2020年,华中科技大学戴江南等^[119]提出另一种 PAC 复合结构。采用荧光玻璃薄膜工艺,将 TeO₂-ZnO-Na₂O-B₂O₃ 玻璃粉与荧光粉混合后直接涂敷在金属 Al 基板上(直径 18 mm,厚度 2 mm),525 °C 烧结,300 °C 退火制备而成,如图14。

当 TeO₂ 为 55% 时,玻璃的热膨胀系数(2.2 × 10⁻⁶ K⁻¹)与 Al 具有的热膨胀系数(2.3 × 10⁻⁶ K⁻¹)相近。由于 Al 具有很高的热导率(>200 W·m⁻¹·K⁻¹),当激光功率从 1.58 W 增加至 5.6 W 时,PAC 结构的工作温度甚至低于 35 °C。

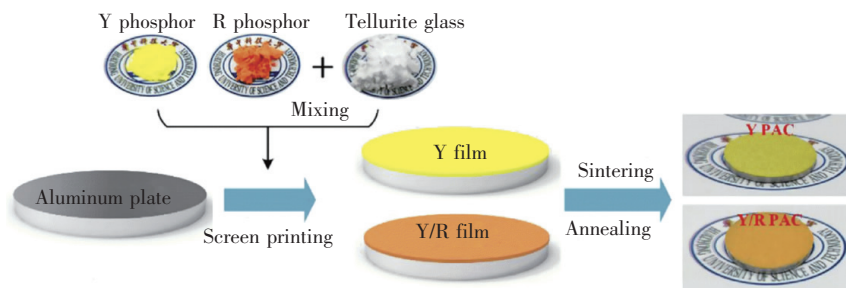


图14 PAC复合结构荧光玻璃薄膜制备流程^[119]

Fig. 14 Fabrication of the PAC converter^[119]

2.3 YAG: Ce³⁺ 单晶荧光体

YAG: Ce³⁺ 单晶内部缺陷少,透过率极高,如图15(a),作为荧光转换材料具有量子效率高、热

导性能好、环境稳定等特性^[82,120-123]。

2016年,美国加州大学圣巴巴拉分校中村修二实验室 Cantore 等^[121]采用厚度 2 mm、直径 1 英

寸、Ce 原子比 0.03% 的 YAG: Ce³⁺ 单晶 (IQE ≈ 95%), 在 442 nm 蓝色激光器峰值效率工作条件下 (1.4 A、4.29 V, 转换效率 31.6%), 获得光通量

515.4 lm、流明效率 86.7 lm · W⁻¹, 如图 15。在 3.0 A、4.85 V 时, 光通量达到 1 100 lm, 流明效率下降至 75.6 lm · W⁻¹ (色温约 7 250 K, 显色指数约 60)。

表 1 YAG: Ce 单晶基本物理参数

Tab. 1 Parameters of YAG: Ce single-crystal

晶体结构	熔点/°C	密度/ (g · cm ⁻³)	Ce 分离系数	460 nm 处的 吸收截面/cm ²	340 nm 处的 吸收截面/cm ²
立方相(石榴石, 空间点群 Ia3d)	1 960	4.56	0.067	3.0 × 10 ⁻¹⁸	1.0 × 10 ⁻¹⁸
内量子效率 (RT-300 °C)	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	莫氏硬度	热膨胀系数/ K ⁻¹	比热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	折射率 (380 ~ 780 nm)
95% ~ 100%	14	8.25	8.6 × 10 ⁻⁶	590	1.84

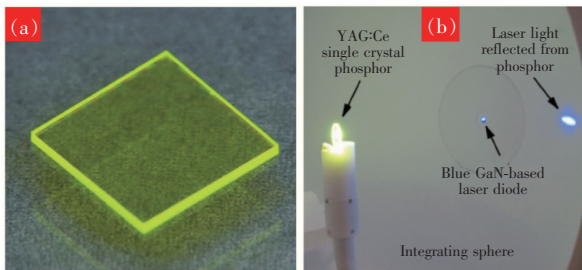


图 15 (a) YAG: Ce³⁺ 单晶^[121]; (b) 激光照明测试结构^[122]。

Fig. 15 (a) Photograph of the YAG: Ce³⁺ single crystal^[121]. (b) Experimental setup^[122].

2019 年, 河南理工大学徐坚等^[123] 在 YAG: Ce 单晶 (YAG: Ce-SC, Ce: 0.2%, 10 mm × 10 mm × 0.5 mm, IQE ~ 91%) 上镀全反射膜 (Reflecting

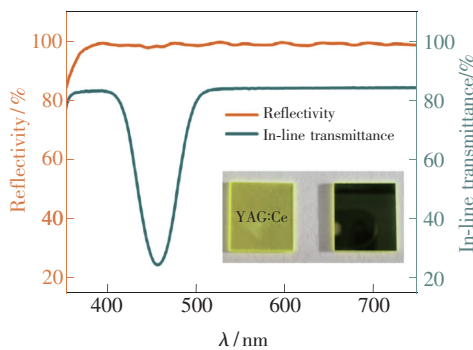


图 16 YAG: Ce³⁺ 单晶的直线透过率和镀全反射膜的 YAG: Ce 单晶的反射光谱, 插图分别为对应样品的照片^[123]。

Fig. 16 In-line transmittance of the pristine YAG: Ce-SC and the reflective spectrum of the reflecting layer, the inset photographs are the pristine YAG: Ce-SC and the YAG: Ce-SC-RL^[123].

layer, RL), 单晶的直线透过率大于 80%, 全反射 RL 膜层使得 YAG: Ce 单晶在 400 ~ 750 nm 的反射率高达 98% ~ 99%, 如图 16。

在 445 nm 蓝色激光 3.38 W 功率、对应的激发功率密度高达 360 W · mm⁻² 时发光依然没有饱和。激光功率从 0.78 W 增加至 3.38 W, 流明效率从 145 lm · W⁻¹ 降低至 135 lm · W⁻¹。

2.4 YAG: Ce³⁺ 陶瓷荧光体

2.4.1 YAG: Ce³⁺ 陶瓷荧光体

2016 年, 韩国成均馆大学 Song 等^[124] 通过共沉淀法制备 YAG: Ce 粉体后, 分别在 1 200 °C、1 450 °C 烧结获得纳米、微米粉体, 之后通过 ZrO₂ 球磨、以 TEOS 为烧结助剂, 压片成型后在石墨真空炉 1 600 °C 烧结 12 h、1 450 °C 空气退火 24 h 后制备了 YAG: Ce 陶瓷荧光体 (Ceramic phosphor plates, CPPs)。采用纳米粉体制备的 CPP 在致密度、晶粒等微观形貌上更加精细和均衡, 在 445 nm 激光辐照下, 饱和功率密度为 14.77 W · mm⁻², 高于采用微米粉制备的 CPP 的 7.75 W · mm⁻², 如图 17 (a)。进一步优化 Ce³⁺ 离子浓度为 0.5%, 对应的饱和功率密度为 19.1 W · mm⁻², 如图 17 (b)。此时色温为 5 994 K, 显色指数为 54.2, 对应的光通量密度为 2 733 lm · mm⁻², 流明效率约为 143 lm · W⁻¹。

2019 年, 厦门大学解荣军教授课题组^[125] 按照 (Y_{0.998}Ce_{0.002})₃Al₅O₁₂ 比例称取商业化 Al₂O₃、Y₂O₃、CeO₂ 粉体原料, 加入 0.3% 的 TEOS 为烧结助剂和 1% PVB 为粘合剂, 通过直径 5 mm 的 Al₂O₃ 球, 球磨 21 h 后, 加入不同比例的 PMMA 为造孔剂, 再球磨 3

h 后,烘干过 200 目筛,获得前驱粉体。干压成型后,800 °C 烧结 10 h 去除有机物,1 650 °C 氮气气氛下管式炉中烧结 4 h,制备具有不同散射能力的多孔

YAG:Ce 陶瓷。陶瓷切割成一定的厚度,抛光面通过硅脂与 Al 基板链接,Al 基板镀 Ag 增加反射,用于性能测试,如图 18(a)~(c)所示。

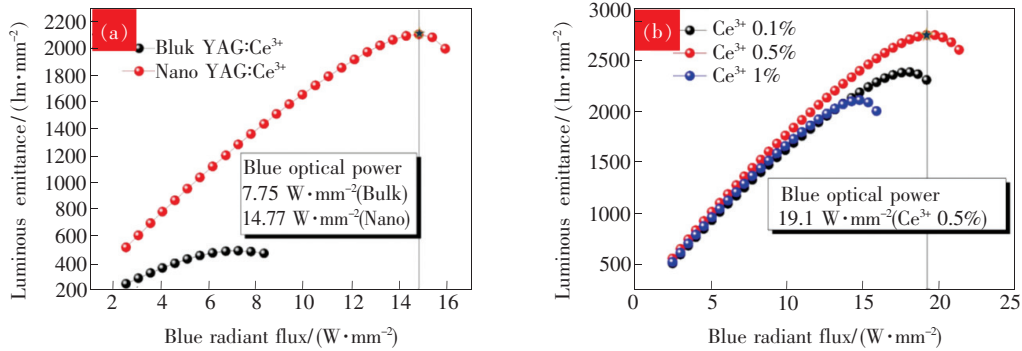


图 17 (a) $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ 陶瓷在 445 nm 蓝光激光下的饱和特性;(b) $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ 陶瓷样品随 Ce^{3+} 离子浓度增加的流明饱和特性^[124]。

Fig. 17 (a) Luminous properties of $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ ceramic phosphor plate under a blue laser diode at 445 nm. (b) Luminous properties of $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ ceramic phosphor plate with increasing the Ce^{3+} ion concentration under a blue laser diode at 445 nm^[124].

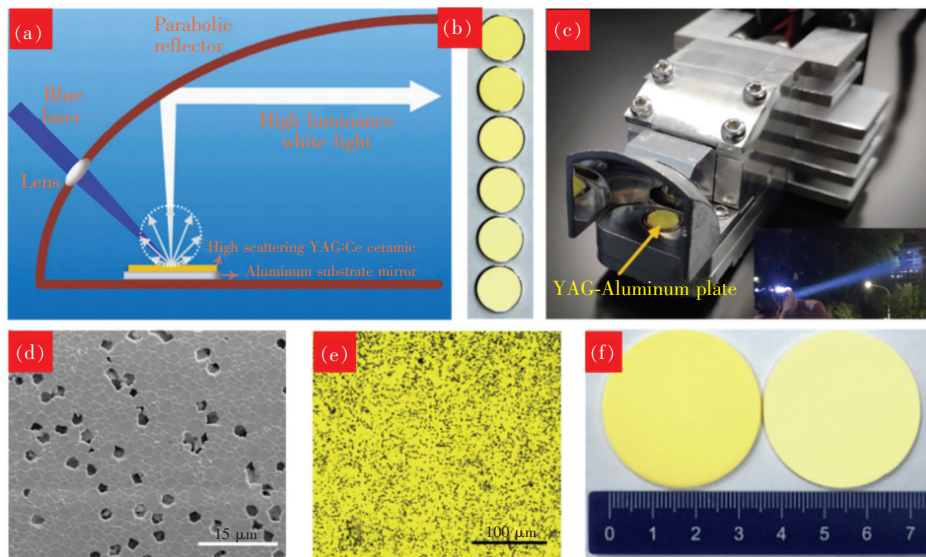


图 18 (a) 激光反射模式发光示意图;(b) YAG-Al 样品图;(c) YAG-Al 样品与激光大灯器件结合;(d) 样品表面 SEM 图;(e) 样品激光共聚焦图;(f) 色轮实物图^[125]。

Fig. 18 (a) Schematic of the reflective configuration for laser-driven white light. (b) Photographs of YAG-Al plates. (c) Photograph of a laser-driven lamp by using the YAG-Al plate. (d) Surface SEM image of the sample. (e) Confocal laser scanning microscopy image of the sample. (f) Photographs of the phosphor wheels^[125].

当气孔率从 0 增加至 24.6%,材料的内量子效率维持在 94.7%~96% 之间,但吸收从 71.9% 下降至 56.8%,热导率也一直降低,这意味着外量子效率降低,整体发光能力下降。因此,455 nm 激光激发下(光斑 0.5 mm²),样品的最大光通量从 1 772 lm 下降至 676 lm,对应的饱和功率从

6.69 W 降低至 3.38 W。

气孔率增加了激光散射,在约 15% 时光斑效果更佳,在该比例下,作者制备了直径约 37 mm 的荧光色轮,如图 18(d)~(f)。在 5 400 r/min 转速增加散热,28.69 W 的激光功率下,光通量达到 7 199 lm,对应的显色指数 65,色温 6 717 K,色

坐标(0.306 2,0.336 3)。

2.4.2 YAG: Ce³⁺ 透明陶瓷荧光体

2019 年, 厦门大学解荣军教授课题组^[126]将商业化粉体原料和 0.5% 的 TEOS 烧结助剂, 通过直径 5 mm 和 10 mm 的 Al₂O₃ 球, 球磨 28 h 后, 烘干过 200 目筛获得前驱粉体, 经干压、冷等成型后, 1 720 ~ 1 780 °C 真空烧结 5 h, 1 450 °C 空气中退火 10 h, 制备了 (Gd, Y, Lu)₃Al₅O₁₂: Ce 及一系列不同 Ce 浓度的 Y_(3-x)Al₅O₁₂: xCe 透明陶瓷 (厚度 1 mm)。在 445 nm 激光激发下 (光

斑 0.5 mm²), 当 Ce 离子浓度从 0.05% 增加至 1.3% 时, 吸收率从 59.05% 上升到 99.97%, 饱和功率密度从 35.86 W · mm⁻² 降低到 13.46 W · mm⁻², 如图 19(a)。这表明 Ce 浓度较低时, 通过降低吸收, 可提高饱和功率密度, 但是对应的光通量也相对降低。Ce 浓度为 0.1% 时, 光通量达到最大 2 227 lm, 对应的饱和功率密度为 25.98 W · mm⁻², 如图 19(a)。通过调节陶瓷厚度平衡热量, 厚度 0.74 mm 的 YAG 陶瓷的饱和功率密度达到 31.94 W · mm⁻², 对应光通量 2 347.9 lm, 色温 7 623 K。

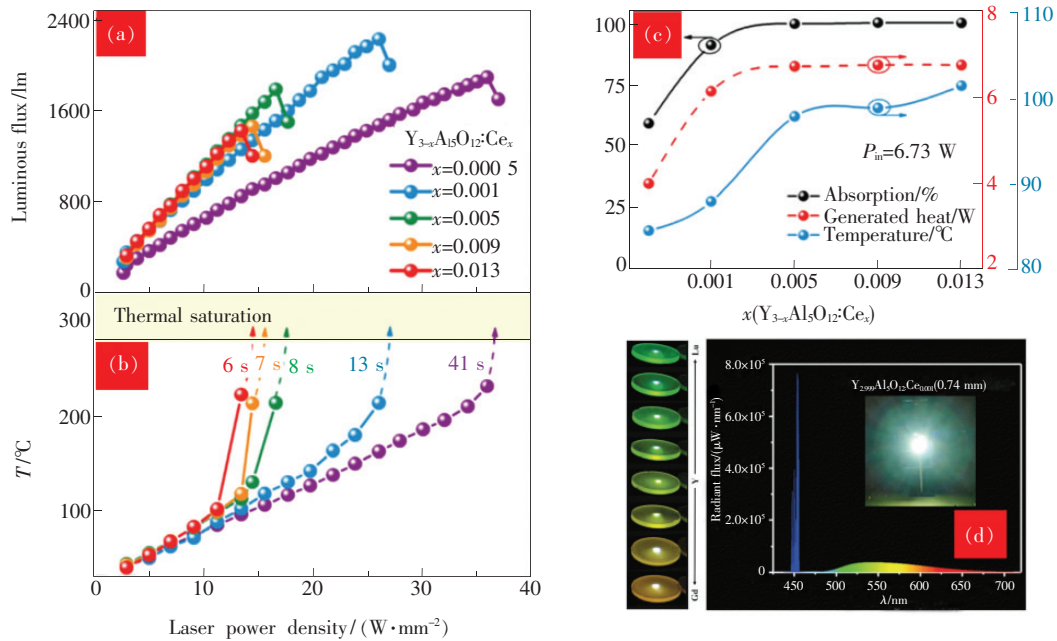


图 19 (a) 光通量随激光功率密度变化曲线; (b) 随着功率密度的增加温度急剧上升; (c) Y_{3-x}Al₅O₁₂: Ce_x (x = 0.000 5 ~ 0.013) 陶瓷的吸收、产热及温度曲线; (d) Lu_{2.999}Al₅O₁₂: Ce_{0.001} 在 49 W · mm⁻² 激光激发下的发射光谱^[126]。

Fig. 19 (a) Output luminous flux of Y_{3-x}Al₅O₁₂: Ce_x (x = 0.000 5 ~ 0.013) ceramics as a function of incident laser power density. (b) Measured temperature increases sharply with increasing incident power. (c) Absorption, generated heat, measured temperature of Y_{3-x}Al₅O₁₂: Ce_x (x = 0.000 5 ~ 0.013) ceramics. (d) Photographs of the samples under blue laser excitation and emission spectra of the Lu_{2.999}Al₅O₁₂: Ce_{0.001} ceramic under 49 W · mm⁻² laser excitation^[126].

2020 年, 笔者课题组^[127] 选用纳米粉体原料并掺杂不同浓度的纳米 MgO-SiO₂, 以 ZrO₂ 球作为磨球, 以酒精为球磨介质, 球磨 4 h 后, 烘干过 200 目筛, 之后在 900 °C 空气条件下去除有机物, 获得前驱体。将粉体压入直径 15 mm 的金属模具中干压成型, 再经过 200 MPa 冷等静压进一步提高致密度。在真空钨丝炉中, 1 750 °C 烧结 5 h 后, 经双面减薄抛光至 1 mm 得到初始样品。再选取一组样品在 1 400 °C 空气中退火 4 h, 去除氧空位进行性能优化, 如图 20(a)。

在 455 nm 激光激发下, 驱动功率为 2.35 W 时 (光斑直径 1 mm), 退火前样品: 流明效率 106 lm · W⁻¹, 蓝光到白光转换效率 31%, 色温 5 790 K, 相应的色坐标为 (0.326 1, 0.338 6); 退火后样品: 流明效率 223 lm · W⁻¹, 如图 20(b), 蓝光到白光转换效率提升到 55%, 色温 4 715 K, 相应的色坐标 (0.363 1, 0.426 7)。x = 0.02 退火前样品显色指数在 72 ~ 79 之间。将样品与激光手电结合体现出良好的出光性能与优秀的有效照明距离。

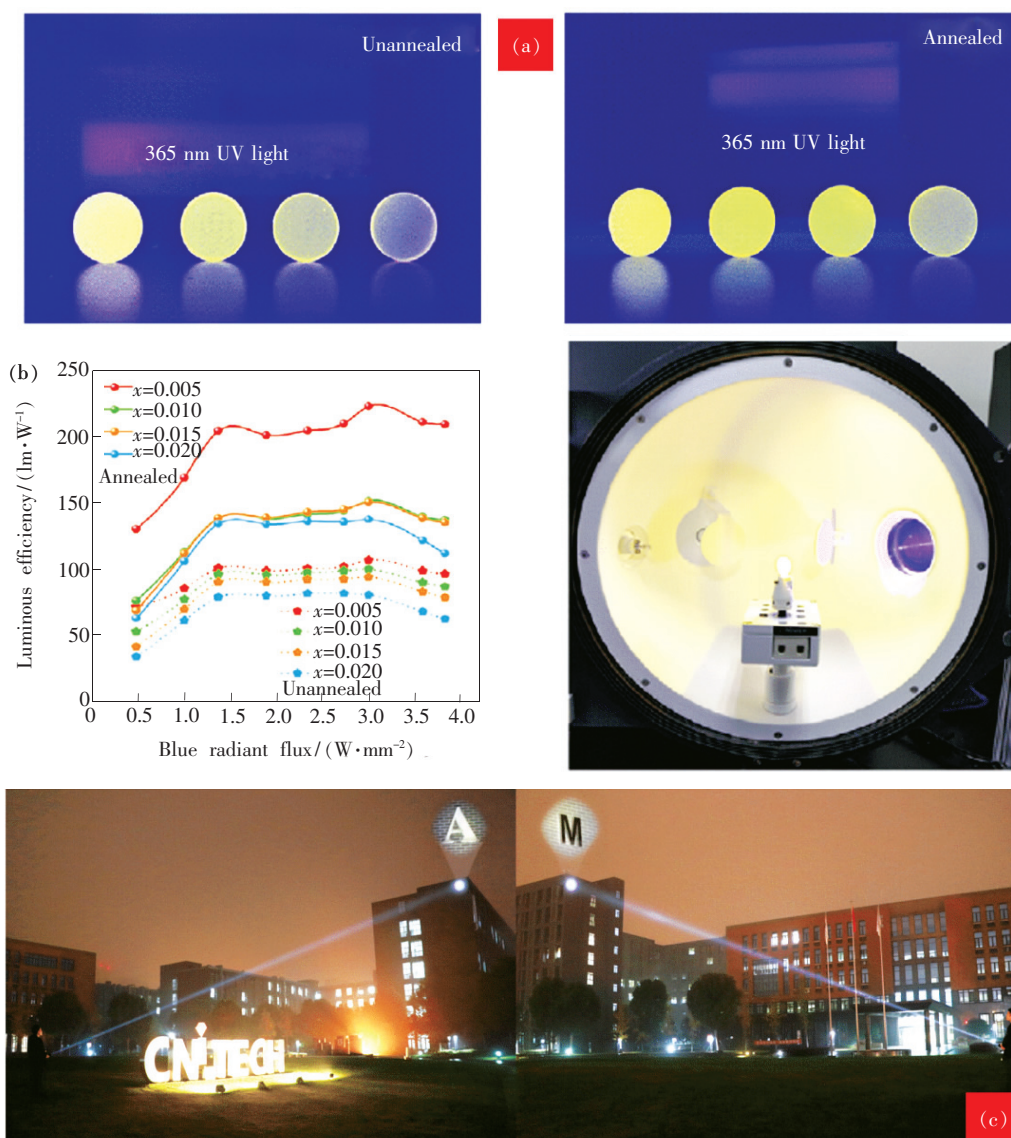


图 20 (a) YAG:0.5%Ce + x MS TCPs ($x=0.005, 0.01, 0.015, 0.020$) 陶瓷在 365 nm 紫外灯下的图片; (b) 陶瓷的发光效率随激光功率密度变化曲线; (c) 退火后的 YAG:0.5%Ce + 0.005MS 陶瓷制成的 LD 光的性能^[127]。

Fig. 20 (a) Images of unannealed and annealed YAG:0.5%Ce + x MS TCPs ($x=0.005, 0.01, 0.015, 0.020$) under 365 nm UV light. (b) Luminous efficiency of all TCPs dependent on the excited power density. (c) Performance of the fabricated LD light using the annealed YAG:0.5%Ce + 0.005MS TCP^[127].

2020 年, 江苏师范大学张乐等^[128]通过固相烧结制备了 $(\text{Y}_{1-y}\text{Ce}_y)_3(\text{Al}_{1-x}\text{Sc}_x)_5\text{O}_{12}$ ($x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$; $y=0.001, 0.003, 0.005, 0.007, 0.01$) 透明陶瓷。通过 Sc^{3+} 取代 Al^{3+} 对 YAG 陶瓷进行调控。其采用纳米级粉体为原料, 0.5% 的正硅酸乙酯为烧结助剂, 0.3% DS005 为分散剂, 以无水乙醇为球磨介质, 球磨 15 h, 经 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 24 h 后过 150 目筛得到粉体。用直径 22 mm 不锈钢模具压制成型, 然后经 200 MPa 冷等静压提高密度, 将得到的素坯在 800 $^{\circ}\text{C}$ 预烧 4 h

以除去有机物, 再将预烧的生坯在真空中 1750 $^{\circ}\text{C}$ 烧结 8 h 得到样品, 最后双面抛光至厚度为 1 mm。

当 $x=0.2, y=0.005$ 时, 辐射发光效率最高为 $218 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 。 $x=0.2, y=0.003$ 时, 内量子效率为 84.2%。 $x=0.3, y=0.003$ 的样品具有很好的热稳定性, 150 $^{\circ}\text{C}$ 时的发光强度只比室温时下降 6%。在 455 nm 激光激发下, 随着 Sc^{3+} 掺杂浓度的升高, Ce:YASG 的发光强度逐渐下降, LD 光源的蓝光发射也降低, 如图 21 所示。

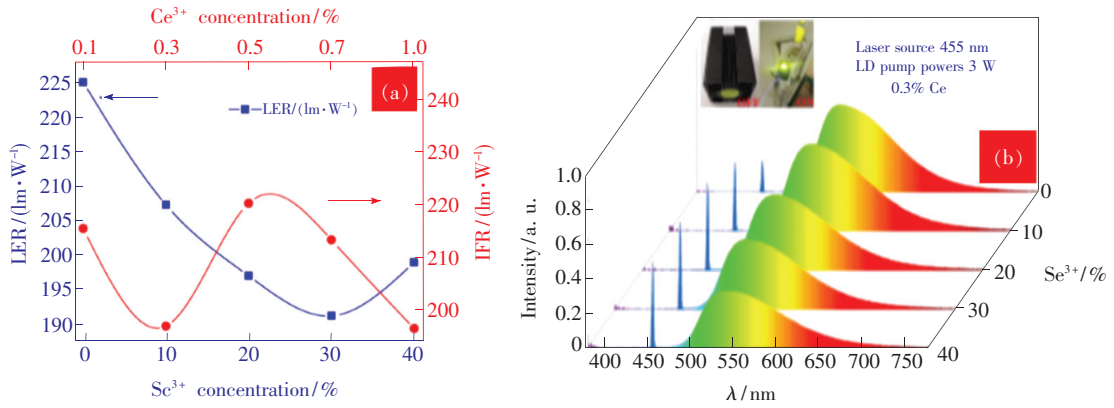


图 21 (a) 辐射发光效率随 Sc³⁺/Ce³⁺ 掺杂浓度的变化曲线; (b) 基于 Ce: YASG 的 LD 器件的外观(插图)和测得的 EL 光谱^[128]。

Fig. 21 (a) LER variation of the TCs-based white LEDs. (b) Appearances of the constructed Ce: YASG TC based white LDs (inset) and the measured EL spectra^[128].

2.4.3 YAG: Ce³⁺ 复合陶瓷

2016 年, 厦门大学解荣军教授课题组^[129] 率先提出 YAG: Ce-Al₂O₃ 复合陶瓷。将 YAG: Ce 荧光粉与 Al₂O₃ 按照质量比 4:6 的比例混合, 用 SPS 在 1 340 ~ 1 380 °C、40 ~ 80 MPa 的条件下保温烧结 5 min。制备的复合陶瓷外量子效率达到 76%,

800 nm 处的直线透过率为 55%。在 445 nm 激光器激发下, 激光功率达到 45 W, 激光功率密度达到 50 W · mm⁻² 依然未出现明显的热猝灭现象, 如图 22(b)。在相关色温为 5 200 K 时, 光通量达到 2 000 lm。

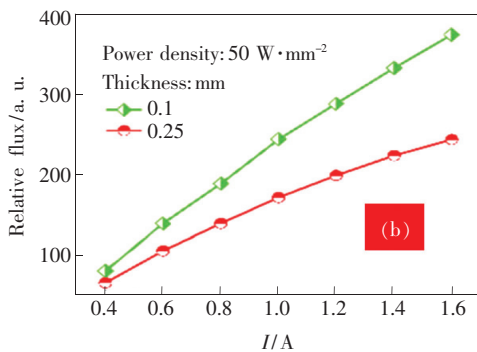
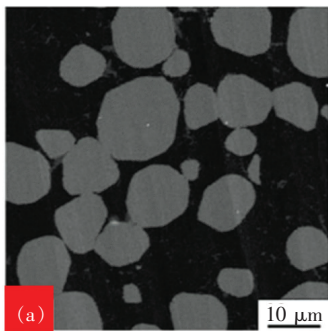


图 22 (a) 陶瓷横截面的 SEM 图; (b) 50 W · mm⁻² 的驱动功率下不同厚度陶瓷的流明饱和比较^[129]。

Fig. 22 (a) Cross-sectional SEM image. (b) Luminescence saturation evaluation under a high power density of 50 W · mm⁻² for phosphor ceramics of two different thicknesses^[129].

2017 年, 韩国世宗大学 Song 等^[130] 通过共沉淀法制备 YAG: Ce³⁺ 前驱体, 经 1 100 ~ 1 200 °C 氮氢气氛烧结后再与不同比例的 Al₂O₃ 粉体混合, 以 SiO₂ 为烧结助剂, 1 600 °C 高真空环境烧结 12 h, 1 450 °C 空气中退火, 最终获得 YAG: Ce-Al₂O₃ 复合荧光陶瓷。Al₂O₃ 浓度达到 60% 时, 在 445 nm 激光驱动下, 光通量达到 770 lm · mm⁻², 流明效率为 193 lm · W⁻¹, 如图 23(a), 色坐标 (0.318, 0.340)。

2018 年, 加州大学 Cozzan 等^[131] 将商用 YAG: Ce 粉体与 α-Al₂O₃ 粉体混合, 通过 SPS 在 1 200 ~ 1 500 °C 保温 5 min 获得样品, 再经过 5% H₂ + 95% Ar 气氛中 1 500 °C 退火 24 h, 最终获得 YAG: Ce-Al₂O₃ 复合陶瓷。

在 450 nm 激光 6.82 W 功率激发下, YAG: Ce 粉体质量比例 50% 时白光性能最好, 光通量为 1 200 lm, 流明效率 165 lm · W⁻¹, 显色指数 65, 色温 5 350 K, 色坐标 (0.34, 0.32)。通过改变激光的入射角, 复合陶瓷出光均匀性优于单晶, 如图 24。

2018 年, 上海硅酸盐研究所刘泽华博士等^[132] 将 YAG: Ce 荧光粉与不同比例的纳米 Al₂O₃ 混合, 通过 SPS 烧结技术, 80 MPa、1 380 °C 保温烧结 5 min, 制成 YAG: Ce-Al₂O₃ 复合陶瓷。

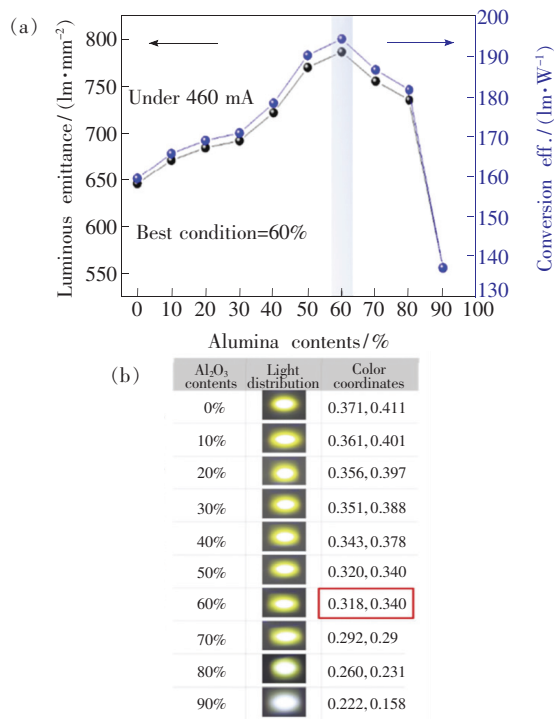


图 23 455 nm 激光下不同 Al₂O₃ 含量 YAG: Ce-Al₂O₃ CPP 的光通量和转换效率 (a) 及白光分布情况 (b) [130]

Fig. 23 (a) Luminous characteristics of YAG: Ce CPP with increasing the Al₂O₃ contents. (b) Comparison with luminous emittance and conversion efficiency, Light distribution of white light [130].

将样品与银基板结合,在 455 nm 激光激发下,20% Al₂O₃ 样品光通量达到 $1\ 888\ \text{lm} \cdot \text{mm}^{-2}$,激光驱动密度为 $13.59\ \text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。Al₂O₃ 含量由 20% 增加到 50%,样品开始出现流明饱和现象,激光饱和点由 $11.73\ \text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$ 提前到 $9.6\ \text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$,如图 25(b)。

2019 年,刘泽华博士等 [133] 进一步研究了 SPS 烧结压力对 YAG: Ce-Al₂O₃ 复合陶瓷激光白光性能的影响。当烧结压力由 40 MPa 提升到 80 MPa,样品流明效率由 $305\ \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 降低到 $258\ \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$,如图 25(c),最大饱和点达到 $32\ \text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$,如图 25(d)。

2019 年,中科院上海硅酸盐研究所王士维研究员等 [134] 通过 3D 打印技术制备了 YAG: Ce-Al₂O₃ 复合陶瓷,如图 26(a)。在 455 nm 激光驱动下,激光光斑直径 $300\ \mu\text{m}$,3D 打印成型陶瓷的荧光饱和阈值达到 $20.7\ \text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$,优于干压成型陶瓷(荧光饱和阈值 $15.7\ \text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$),如图 26(c)。

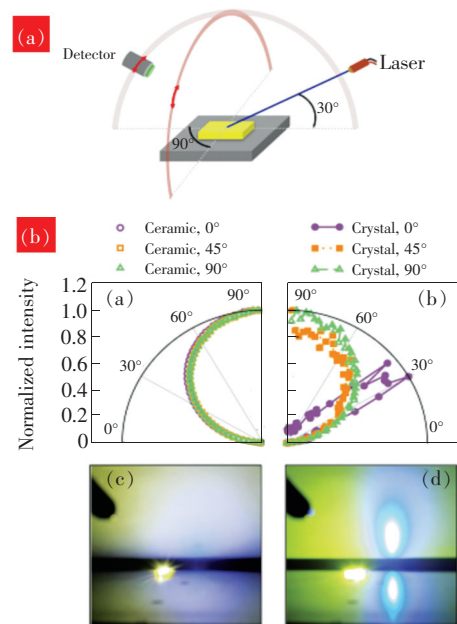


图 24 (a) 不同角度的发光强度测量模型,激光器固定在样品表面 30° 方向,改变探测器的角度; (b) YAG: Ce-Al₂O₃ 复合陶瓷和 Ce: YAG 单晶在 0°、45° 和 90° 时 375 ~ 525 nm 范围内的归一化强度及发光实物图 [131]。

Fig. 24 (a) Scheme for measuring the angular dependence of light emission. (b) Normalized emission intensity for 375 - 525 nm emission for YAG: Ce-Al₂O₃ ceramic composite and roughened Ce: YAG single crystal. Data for azimuthal detector angles of 0°, 45° and 90° relative to the laser path are shown [131].

2020 年,中国计量大学郝强强等 [135] 制备了 $\text{Y}_{3-y}\text{Ce}_y\text{Al}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ ($x = 1, 2, 3; y = 0.06, 0.08, 0.10$); YAGG: Ce) 荧光粉和 YAG 陶瓷复合的 YAGG: Ce-YAG 陶瓷。首先通过溶胶-凝胶法获得前驱粉体,再经 $1\ 400\ ^\circ\text{C}$ 、5% H₂ 下烧结制备 YAGG: Ce 荧光粉。随后按照质量比为 YAG: (YAGG: Ce) = 2: 1 进行配比,然后在 Al₂O₃ 球磨罐内球磨 24 h,0.5% 的正硅酸乙酯为烧结助剂,无水乙醇、Al₂O₃ 球为球磨介质,烘干、过 200 目筛,然后用 20 mm 的模具压成片,210 MPa 下冷等静压提高致密度,在 $1\ 700 \sim 1\ 800\ ^\circ\text{C}$ 下真空烧结 5 h,最后双面抛光至厚度为 0.5 mm。

YAGG: Ce 与 YAG 具有相似的结构、折射率,获得的陶瓷具有高透明度。由于粉体的高发光效率,合成的陶瓷也有很好的发光特性。 $1\ 700\ ^\circ\text{C}$ 下烧结的复合陶瓷外量子效率 (EQE) 达到 68.3%,如图 27(a)。 $1\ 750\ ^\circ\text{C}$ 下烧结的样品具有很好的热

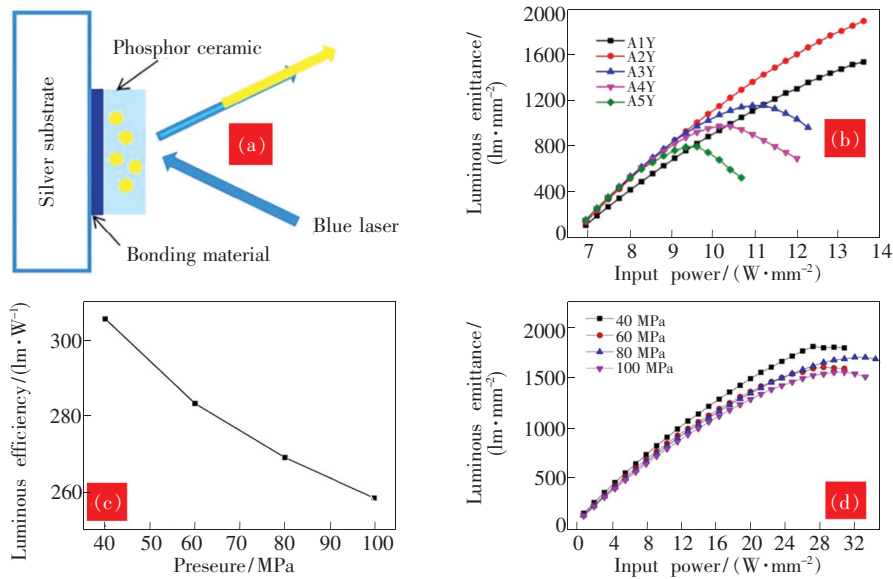


图 25 蓝光激光陶瓷发光的反射模型 (a) 和光通量与输入功率的关系曲线 (b)^[132]; 不同烧结压力下的发光效率 (c) 和发光强度与输入功率的关系 (d)^[133]。

Fig. 25 Diagram of reflection mode to measure the luminous of ceramics under the blue laser(a) and the luminous emittance of different phosphor content of ceramics *versus* input power(b)^[132]. Luminous efficiency plotted as a function of the P_{load} (c) and the intensity of luminous emittance for sintered ceramic plot as a function of the input power(d)^[133].

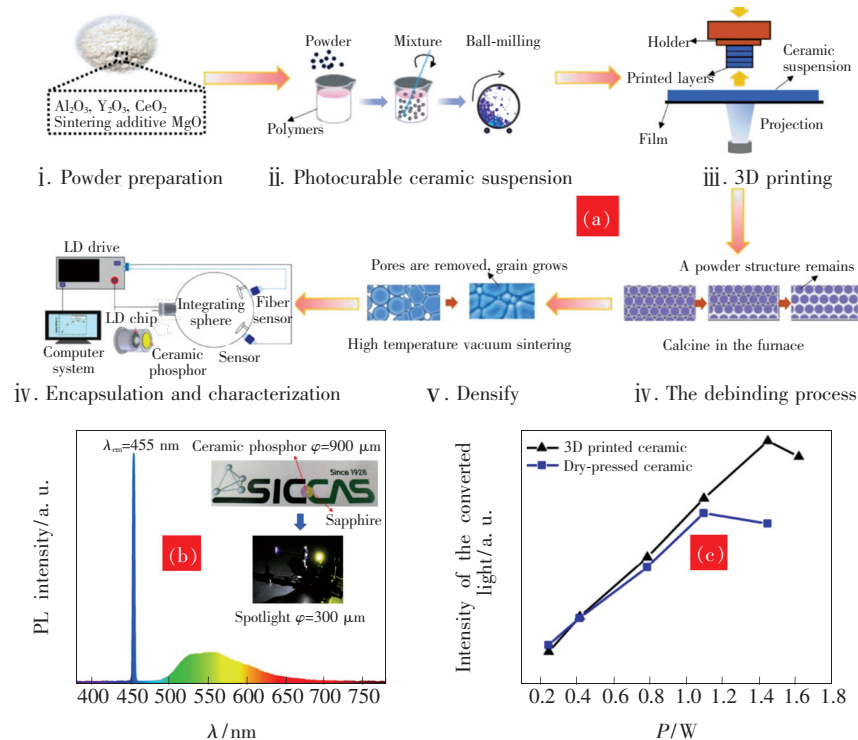


图 26 (a) 3D 打印制备 YAG: Ce-Al₂O₃ 复合陶瓷的流程图; (b) 光致发光光谱, 插图显示了简单模块的结构, 该模块将陶瓷粘附到蓝宝石衬底上(上图), 并通过激光照射(下图)照亮图像; (c) 通过 3D 打印和干压法制备的陶瓷的发射强度与激发功率的关系曲线^[134]。

Fig. 26 (a) Schematic diagram of the procedure for the preparation of the YAG: Ce-Al₂O₃ composite ceramic phosphor *via* 3D printing. (b) Photoluminescence emission spectrum of the 3D printed YAG: Ce-Al₂O₃ ceramic. Inset shows the configuration of the simple module that ceramic was adhered onto the sapphire substrate(upper) and the illuminated image with laser irradiation(below). (c) Plots of the emission intensity *versus* the excitation power for the ceramic-phosphors prepared *via* 3D printing and dry-pressing method^[134].

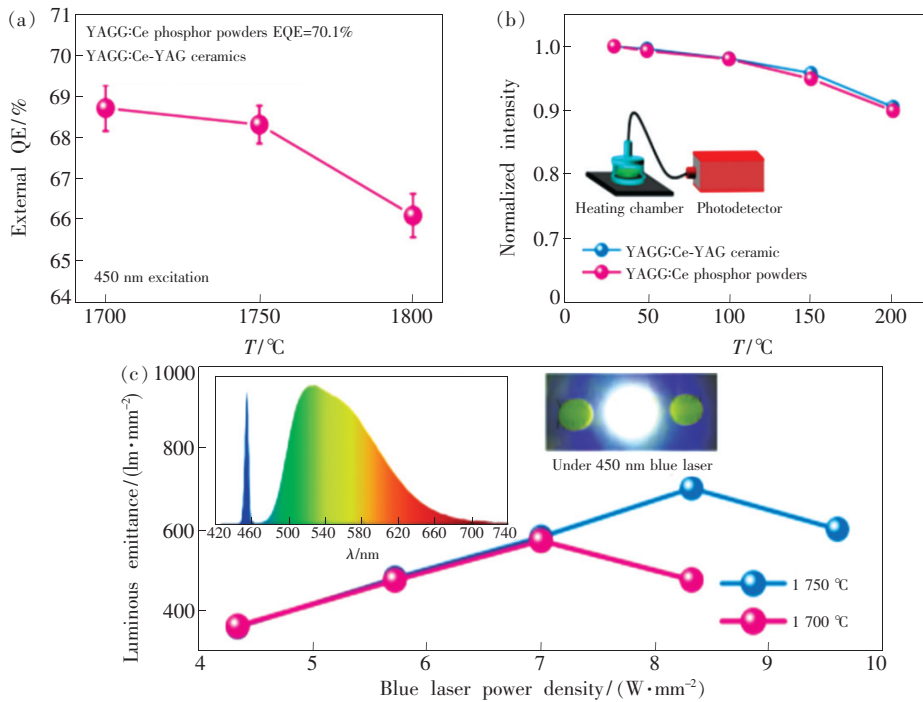


图 27 (a)不同温度下烧结的 YAGG:Ce-YAG 陶瓷的外量子效率;(b)热稳定性;(c)450 nm 不同功率密度激光激发下的发光效率^[135]。

Fig. 27 (a) External QE of YAGG: Ce-YAG ceramics achieved at 1 700, 1 750, 1 800 °C. (b) Thermal quenching behavior of YAGG: Ce-YAG ceramic and original YAGG: Ce phosphor powders. (c) Luminous emittance of YAGG: Ce-YAG ceramic products under the excitation of different blue laser power density^[135].

稳定性,200 °C时发光强度为室温时的 90%,如图 27(b), 同样其在室温时的热导率达到 $9.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。在 450 nm 波长激光的激发下,驱动功率为 $8.2 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时,发光强度达 $700 \text{ lm} \cdot \text{mm}^{-2}$,如图 27(c)。

3 结论与展望

荧光玻璃、薄膜、晶体、陶瓷在激光照明和显示中的各类性能评估如表 2 所示。荧光玻璃和薄膜在制备成本、规模生产和色彩的拓展性方面具有较大的优势,在导热性、饱和阈值和激光转换效率方面的性能表现较为平淡;其与热沉技术结合,才能在激光照明和显示中保持一定的发光性能。

荧光晶体与陶瓷本身则在导热性、饱和阈值以及发光效率等性能方面具有独特的优势,辅以热沉技术,其性能则会更加优良。但是晶体的色彩拓展性较弱,制备成本高,不易大规模生产。相对晶体而言,陶瓷的成本有所降低,并有望实现同质组分多色陶瓷的复合。

YAG:Ce 适合蓝光激发、发光效率高,仍然是下一代激光照明用主流荧光转换材料。传统 YAG:Ce 荧光粉与有机树脂、硅胶结合的封装方式耐热性差、热导率低 ($0.1 \sim 0.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),不能满足 LD 高功率激发密度的需求。为此,人们提出了荧光玻璃、荧光陶瓷、荧光晶体等具有高热导率 ($1 \sim 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 的远程荧

表 2 荧光玻璃、薄膜、晶体、陶瓷在激光照明和显示中的性能评估

Tab. 2 Evaluation of phosphor in glass, phosphor film, single-crystal phosphor and ceramic phosphor in laser lighting and display

	导热性	饱和阈值	效率	成本	可拓展性	规模生产
玻璃	★★	★★	★★	★★★★	★★★★★	★★★★★
薄膜	★★	★★	★★	★★★★	★★★★★	★★★★★
晶体	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★	★	★
陶瓷	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★	★★★	★★★★

光体。基于 YAG: Ce 的各类远程荧光体, 发射光谱以黄光为主, 青、绿、红光成分不足。这导致 LD 照明器件的显色指数偏低、色温偏高, 白光质量有待进一步提升。寻找适合 LD 光源高功率密度特点的多色荧光转换材料, 实现 LD 照明光源色彩品质的可控调节, 是目前 LD 照明技术面临的巨大挑战之一。

在多色荧光转换材料开发方面, 人们将 β 塞隆^[136-137] 和 LuAG: Ce 绿色荧光体^[104, 126, 138-145]、LSN: Ce 黄色荧光体^[146-148]、CASN: Eu 红色荧光体^[149-155] 引入 LD 照明中。此外, 虽然 470 ~ 500 nm 青色发光材料已有相关研究基础, 但是其在激光照明应用中的探索目前还是空白。因此, 研究适合蓝光激发的青色荧光粉具有极为重要的价值。荧光玻璃薄膜工艺具有较强的包容性, 商用绿、黄、红等各色荧光转换材料均可在同一薄膜中复合。同时辅助高导热基板, 为 LD 照明器件色彩品质的有效调控提供了一种方案。在相对较小的激光功率范围内, 预计该方案可以满足 LD 照明器件的应用需求。而在较大激光功率下, 荧光薄膜的长期服役稳定性有待进一步验证。

荧光晶体、荧光陶瓷自身具有热导率和机械

强度高、抗热震特性好、在各类激光功率服役条件下稳定性好的优点。但现有荧光晶体、荧光陶瓷主要以单一发光色彩形式呈现, 在色彩复合及白光色彩品质调控方面, 还需开拓新的技术方案。同时, 现有的商用氮化物、氟化物等红色荧光材料, 在陶瓷化复合过程中的氧化、腐蚀、分解等问题仍未解决。能够实现稳定陶瓷化复合的新型红色荧光材料是未来发展的一个方向。

除荧光转换材料发光颜色之外, LD 性能测试方式的差异化为统一标准评价激光-荧光转换性能带来了困难^[156]。激光-荧光转换性能测试有透射、反射两种模式。每一种模式中, 荧光块体材料的厚度、表面形貌、粗糙度、是否外接热沉等因素均会影响材料的光转换效率。激光功率是连续变化还是单点采集, 由此引起的荧光材料的发光饱和特性则截然不同。在发光饱和特性评估时, 选取激光功率或激光功率密度等评估方式的差别, 以及激光斑点尺寸信息不全、斑点尺寸测量时的误差, 为统一评估荧光转换材料的激光功率耐受特性带来了困难。因此, 激光照明中相关测试标准的建立也是激光照明用荧光转换材料性能评价必然面临的问题。

参 考 文 献:

- [1] NAKAMURA S, MUKAI T, SENOH M. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64(13):1687-1689.
- [2] SCHUBERT E F, KIM J K. Solid-state light sources getting smart [J]. *Science*, 2005, 308(5726):1274-1278.
- [3] PIMPUTKAR S, SPECK J S, DENBAARS S P, *et al.*. Prospects for LED lighting [J]. *Nat. Photonics*, 2009, 3(4):180-182.
- [4] DAICHO H, IWASAKI T, ENOMOTO K, *et al.*. A novel phosphor for glareless white light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2012, 3:1132.
- [5] ZHU H M, LIN C C, LUO W Q, *et al.*. Highly efficient non-rare-earth red emitting phosphor for warm white light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2014, 5:4312.
- [6] PUST P, WEILER V, HECHT C, *et al.*. Narrow-band red-emitting Sr[LiAl₃N₄]:Eu²⁺ as a next-generation LED-phosphor material [J]. *Nat. Mater.*, 2014, 13(9):891-896.
- [7] YOON H K, ARUNKUMAR P, KIM B Y, *et al.*. A zero-thermal-quenching phosphor [J]. *Nat. Mater.*, 2017, 16(5):543-550.
- [8] HOERDER G J, SEIBALD M, BAUMANN D, *et al.*. Sr[Li₂Al₂O₂N₂]:Eu²⁺—a high performance red phosphor to brighten the future [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10:1824.
- [9] QIAO J W, ZHOU G J, ZHOU Y Y, *et al.*. Divalent europium-doped near-infrared-emitting phosphor for light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1):5267.
- [10] DAI Q L, FOLEY M E, BRESHIKE C J, *et al.*. Ligand-passivated Eu:Y₂O₃ nanocrystals as a phosphor for white light emitting diodes [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2011, 133(39):15475-15486.
- [11] CHEN W T, SHEU H S, LIU R S, *et al.*. Cation-size-mismatch tuning of photoluminescence in oxynitride phosphors [J].

- J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134(19):8022-8025.
- [12] YE H C W, CHEN W T, LIU R S, *et al.*. Origin of thermal degradation of $\text{Sr}_{2-x}\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}_x$ phosphors in air for light-emitting diodes [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134(34):14108-14117.
- [13] PARK W B, SINGH S P, SOHN K S. Discovery of a phosphor for light emitting diode applications and its structural determination, $\text{Ba}(\text{Si}, \text{Al})_5(\text{O}, \text{N})_8:\text{Eu}^{2+}$ [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2014, 136(6):2363-2373.
- [14] QIAO J W, NING L X, MOLOKEEV M S, *et al.*. Eu^{2+} site preferences in the mixed cation $\text{K}_2\text{BaCa}(\text{PO}_4)_2$ and thermally stable luminescence [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2018, 140(30):9730-9736.
- [15] LI X F, BUDAI J D, LIU F, *et al.*. New yellow $\text{Ba}_{0.93}\text{Eu}_{0.07}\text{Al}_2\text{O}_4$ phosphor for warm-white light-emitting diodes through single-emitting-center conversion [J]. *Light Sci. Appl.*, 2013, 2(1):e50.
- [16] WANG L, XIE R J, LI Y Q, *et al.*. $\text{Ca}_{1-x}\text{Li}_x\text{Al}_{1-x}\text{Si}_{1+x}\text{N}_3:\text{Eu}^{2+}$ solid solutions as broadband, color-tunable and thermally robust red phosphors for superior color rendition white light-emitting diodes [J]. *Light Sci. Appl.*, 2016, 5:e16155.
- [17] DAI P P, LI C, ZHANG X T, *et al.*. A single Eu^{2+} -activated high-color-rendering oxychloride white-light phosphor for white-light-emitting diodes [J]. *Light Sci. Appl.*, 2016, 5(2):e16024.
- [18] SENDEN T, VAN DIJK-MOES R J A, MEIJERINK A. Quenching of the red Mn^{4+} luminescence in Mn^{4+} -doped fluoride LED phosphors [J]. *Light Sci. Appl.*, 2018, 7(1):8.
- [19] WEI Y, XING G C, LIU K, *et al.*. New strategy for designing orangish-red-emitting phosphor *via* oxygen-vacancy-induced electronic localization [J]. *Light Sci. Appl.*, 2019, 8(1):15.
- [20] ZHAO M, LIAO H X, MOLOKEEV M S, *et al.*. Emerging ultra-narrow-band cyan-emitting phosphor for white LEDs with enhanced color rendition [J]. *Light Sci. Appl.*, 2019, 8(1):38.
- [21] JIA Z W, YUAN C X, LIU Y F, *et al.*. Strategies to approach high performance in Cr^{3+} -doped phosphors for high-power NIR-LED light sources [J]. *Light Sci. Appl.*, 2020, 9:86.
- [22] WIERERJR 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.
- [23] CHO J, SCHUBERT E F, KIM J K. Efficiency droop in light-emitting diodes: challenges and countermeasures [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2013, 7(3):408-421.
- [24] 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(122):1800173.
- [25] STREK W, CICHY B, RADOSINSKI L, *et al.*. Laser-induced white-light emission from graphene ceramics-opening a band gap in graphene [J]. *Light Sci. Appl.*, 2015, 4:e237.
- [26] ABU-AGEEL N, ASLAM D. Laser-driven visible solid-state light source for etendue-limited applications [J]. *J. Disp. Technol.*, 2014, 10(8):700-703.
- [27] KURITZKY L Y, SPECK J S. Lighting for the 21st century with laser diodes based on non-basal plane orientations of GaN [J]. *MRS Commun.*, 2015, 5(3):463-473.
- [28] WANG L, XIE R J, SUEHIRO T, *et al.*. Down-conversion nitride materials for solid state lighting: recent advances and perspectives [J]. *Chem. Rev.*, 2018, 118(4):1951-2009.
- [29] SCHÜTT F, ZAPF M, SIGNETTI S, *et al.*. Conversionless efficient and broadband laser light diffusers for high brightness illumination applications [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11:1437.
- [30] ZHANG D, XIAO W G, LIU C, *et al.*. Highly efficient phosphor-glass composites by pressureless sintering [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11:2805.
- [31] MAIMAN T H. Stimulated optical radiation in ruby [J]. *Nature*, 1960, 187(4736):493-494.
- [32] NARUKAWA Y, NAGAHAMA S I, TAMAKI H, *et al.*. Development of high-luminance white light source using GaN-based light emitting devices [J]. *Oyo Butsuri*, 2005, 74(11):1423-1432.
- [33] GEOCKE T, WEBER S, SIELE R M, *et al.*. Lighting innovations of future BMW vehicles [C]. *11th International Symposium on Automotive Lighting-ISAL 2015-Proceedings of The Conference, Darmstadt, Germany*, 2015:19-28.
- [34] 毕武. 汽车激光前照灯关键技术研究 [D]. 天津:天津工业大学, 2019.
- BI W. *The Research on Key Technologies of Automotive Laser Headlamp* [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019. (in Chinese)

- [35] LIU Y F, ZHANG J X, ZHANG C H, *et al.* . Ba₉Lu₂Si₆O₂₄: Ce³⁺ : an efficient green phosphor with high thermal and radiation stability for solid-state lighting [J]. *Adv. Opt. Mater.* , 2015, 3(8) :1096-1101.
- [36] LIU Y F, ZHANG J X, ZHANG C H, *et al.* . High efficiency green phosphor Ba₉Lu₂Si₆O₂₄: Tb³⁺ : visible quantum cutting *via* cross-relaxation energy transfers [J]. *Phys. Chem. C* , 2016, 120(4) :2362-2370.
- [37] LIU Y F, SILVER J, XIE R J, *et al.* . An excellent cyan-emitting orthosilicate phosphor for NUV-pumped white LED application [J]. *J. Mater. Chem. C* , 2017, 5(47) :12365-12377.
- [38] 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.
- [39] LIU Y F, ZHANG X, HAO Z D, *et al.* . Generating yellow and red emissions by co-doping Mn²⁺ to substitute for Ca²⁺ and Sc³⁺ sites in Ca₃Sc₂Si₃O₁₂: Ce³⁺ green emitting phosphor for white LED applications [J]. *J. Mater. Chem.* , 2011, 21(41) :16379-16384.
- [40] LIU Y F, ZHANG X, HAO Z D, *et al.* . Generation of broadband emission by incorporating N³⁻ into Ca₃Sc₂Si₃O₁₂: Ce³⁺ garnet for high rendering white LEDs [J]. *J. Mater. Chem.* , 2011, 21(17) :6354-6358.
- [41] LIU Y F, ZHANG X, HAO Z D, *et al.* . Tunable full-color-emitting Ca₃Sc₂Si₃O₁₂: Ce³⁺, Mn²⁺ phosphor *via* charge compensation and energy transfer [J]. *Chem. Commun.* , 2011, 47(38) :10677-10679.
- [42] SHANG M M, LI C X, LIN J. How to produce white light in a single-phase host [J]. *Chem. Soc. Rev.* , 2014, 43(5) :1372-1386.
- [43] WANG L, WANG X J, TAKEDA T, *et al.* . Structure, luminescence, and application of a robust carbide nitride blue phosphor (Al_{1-x}Si_xC_xN_{1-x}: Eu²⁺) for near UV-LED driven solid state lighting [J]. *Chem. Mater.* , 2015, 27(24) :8457-8466.
- [44] ZHANG X J, ZHANG J L, WU X L, *et al.* . Discovery of blue-emitting Eu²⁺-activated sodium aluminate phosphor with high thermal stability *via* phase segregation [J]. *Chem. Eng. J.* , 2020, 388 :124289.
- [45] NEUMANN A, WIERER J J, DAVIS W, *et al.* . Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality [J]. *Opt. Express* , 2011, 19(S4) :A982-A990.
- [46] XU Y, HU H F, ZHUANG W D, *et al.* . Highly stable white light from ultraviolet laser diode [C]. *Proceedings of SPIE, Optoelectronic Materials and Devices III, Hangzhou* , 2008 :1-4.
- [47] LIU S, SUN P, LIU Y F, *et al.* . Warm white light with a high color-rendering index from a single Gd₃Al₄GaO₁₂: Ce³⁺ transparent ceramic for high-power LEDs and LDs [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces* , 2019, 11(2) :2130-2139.
- [48] BLASSE G, BRIL A. A new phosphor for flying-spot cathode-ray tubes for color television: yellow-emitting Y₃Al₅O₁₂-Ce³⁺ [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 1967, 11(2) :53-55.
- [49] SETLUR A A. Phosphors for LED-based solid-state lighting [J]. *Electrochem. Soc. Interface* , 2009, 18(4) :32-36.
- [50] BACHMANN V, RONDA C, MEIJERINK A. Temperature quenching of yellow Ce³⁺ luminescence in YAG: Ce [J]. *Chem. Mater.* , 2009, 21(10) :2077-2084.
- [51] BIRKEL A, DENAULT K A, GEORGE N C, *et al.* . Rapid microwave preparation of highly efficient Ce³⁺-substituted garnet phosphors for solid state white lighting [J]. *Chem. Mater.* , 2012, 24(6) :1198-1204.
- [52] SHANG M M, FAN J, LIAN H Z, *et al.* . A double substitution of Mg²⁺-Si⁴⁺/Ge⁴⁺ for Al(1)³⁺-Al(2)³⁺ in Ce³⁺-doped garnet phosphor for white LEDs [J]. *Inorg. Chem.* , 2014, 53(14) :7748-7755.
- [53] SONG Z, LIU X L, HE L Z, *et al.* . Correlation between the energy level structure of cerium-doped yttrium aluminum garnet and luminescent behavior at varying temperatures [J]. *Mater. Res. Express* , 2016, 3(5) :055501-1-8.
- [54] MA X G, LI X Y, LI J Q, *et al.* . Pressureless glass crystallization of transparent yttrium aluminum garnet-based nanoceramics [J]. *Nat. Commun.* , 2018, 9 :1175.
- [55] HUANG P, ZHOU B Y, ZHENG Q, *et al.* . Nano wave plates structuring and index matching in transparent hydroxyapatite-YAG: Ce composite ceramics for high luminous efficiency white light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.* , 2020, 32(1) :905951.
- [56] YUAN R, HUANG M, ZHENG F, *et al.* . Rapid, convenient and low-energy preparation of spherical rare earth doped YAG phosphors by a laser sintering method [J]. *J. Mater. Chem. C* , 2019, 7(42) :13070-13079.
- [57] UEDA J, TANABE S. (INVITED) Review of luminescent properties of Ce³⁺-doped garnet phosphors; new insight into the

- effect of crystal and electronic structure [J]. *Opt. Mater.*, 2019,1:100018.
- [58] 郑飞,茅云蔚,杨波波,等. 基于 YAG: Ce³⁺ 荧光粉复合 Eu³⁺ 掺杂荧光玻璃的激光照明器件 [J]. *发光学报*, 2019, 40(7):842-848.
- ZHENG F, MAO Y W, YANG B B, *et al.*. Laser lighting device based on YAG: Ce³⁺ phosphor composite Eu³⁺ doped phosphor-in-glasses [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019,40(7):842-848. (in Chinese)
- [59] KIM Y H, VISWANATH V S, 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.
- [60] CHUNGW J, NAM Y H. Review—a review on phosphor in glass as a high power LED color converter [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2020,9:016010-1-15.
- [61] FUJITA S, YOSHIHARA S, SAKAMOTO A, *et al.*. YAG glass-ceramic phosphor for white LED (I): background and development [C]. *Proceedings of SPIE, Fifth International Conference on Solid State Lighting, San Diego*, 2005:594111.
- [62] TANABE S, FUJITA S, YOSHIHARA S, *et al.*. YAG glass-ceramic phosphor for white LED (II): luminescence characteristics [C]. *Proceedings of SPIE, Fifth International Conference on Solid State Lighting, San Diego*, 2005:594112.
- [63] CHEN D Q, XU W, ZHOU Y, *et al.*. Color tunable dual-phase transparent glass ceramics for warm white light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017,5(3):738-746.
- [64] CHEN D Q, XIANG W D, LIANG X J, *et al.*. Advances in transparent glass-ceramic phosphors for white light-emitting diodes—a review [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2015,35(3):859-869.
- [65] XIANG R, LIANG X J, XI Q Y. *et al.*. A chromaticity-tunable white LED by screen-printing red phosphor coating on PiG plates [J]. *Ceram. Int.*, 2016,42(16):19276-19282.
- [66] XIANG R, LIANG X J, LI P Z, *et al.*. A thermally stable warm WLED obtained by screen-printing a red phosphor layer on the LuAG: Ce³⁺ PiG substrate [J]. *Chem. Eng. J.*, 2016,306:858-865.
- [67] LIN H, WANG B, XU J, *et al.*. Phosphor-in-glass for high-powered remote-type white AC-LED [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014,6(23):21264-21269.
- [68] ZHANG R, LIN H, YU Y L, *et al.*. A new-generation color converter for high-power white LED: transparent Ce³⁺: YAG phosphor-in-glass [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2014,8(1):158-164.
- [69] LIN H, HU T, CHENG Y, *et al.*. Glass ceramic phosphors: towards long-lifetime high-power white light-emitting-diode applications—a review [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2018,12(6):1700344-1-31.
- [70] ZHANG X J, HUANG L, PAN F J, *et al.*. Highly thermally stable single-component white-emitting silicate glass for organic-resin-free white-light-emitting diodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014,6(4):2709-2717.
- [71] ZHANG X J, YU J B, WANG J, *et al.*. Facile preparation and ultrastable performance of single-component white-light-emitting phosphor-in-glass used for high-power warm white LEDs [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015,7(51):28122-28127.
- [72] ZHANG J H, GONG S M, YU J B, *et al.*. Thermally stable white emitting Eu³⁺ complex@nanozeolite@luminescent glass composite with high CRI for organic-resin-free warm white LEDs [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017,9(8):7272-7281.
- [73] DENG J K, LI W, ZHANG H R, *et al.*. Eu³⁺-doped phosphor-in-glass: a route toward tunable multicolor materials for near-UV high-power warm-white LEDs [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017,5(3):1600910.
- [74] JIANG Y G, JIANG B X, YUAN X Q, *et al.*. Preparation and luminescence of Ce: YAG transparent glass ceramics by liquid-phase sintering [J]. *Mater. Lett.*, 2017, 195:120-122.
- [75] PENG Y, LI R X, CHENG H, *et al.*. Facile preparation of patterned phosphor-in-glass with excellent luminous properties through screen-printing for high-power white light-emitting diodes [J]. *J. Alloys Compd.*, 2017,693:279-284.
- [76] LI H, XU X J, LI Y, *et al.*. Preparation and luminescent properties of the coating of phosphor in lead-free glass by multi-layer screen-printing [J]. *J. Alloys Compd.*, 2016,684:372-378.
- [77] 黄波,童玉珍,李成明,等. 基于荧光玻璃的高效 LED 白光技术 [J]. *发光学报*, 2016,37(6):637-643.
- HUANG B, TONG Y Z, LI C M, *et al.*. High-efficiency technology of LED white light based on phosphor glass [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016,37(6):637-643. (in Chinese)
- [78] REVAUX A, DANTELLE G, GEORGE N, *et al.*. A protected annealing strategy to enhanced light emission and photostability of YAG: Ce nanoparticle-based films [J]. *Nanoscale*, 2011,3(5):2015-2022.

- [79] ZHAO Y Y, XU H R, ZHANG X Y, *et al.*. Facile synthesis of YAG: Ce³⁺ thick films for phosphor converted white light emitting diodes [J]. *J. Eur. Ceramic Soc.*, 2015, 35(13):3761-3764.
- [80] LAI C F, LI J S, SHEN C W. High-efficiency robust free-standing composited phosphor films with 2D and 3D nanostructures for high-power remote white LEDs [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(5):4851-4859.
- [81] LATYNINA A, WATANABE M, INOMATA D, *et al.*. Properties of czochralski grown Ce, Gd: Y₃Al₅O₁₂ single crystal for white light-emitting diode [J]. *J. Alloys Compd.*, 2013, 553:89-92.
- [82] ARJOCA S, VÍLLORA E G, INOMATA D, *et al.*. Temperature dependence of Ce: YAG single-crystal phosphors for high-brightness white LEDs/LDs [J]. *Mater. Res. Express*, 2015, 2(5):055503-1-9.
- [83] YANG C, GU G R, ZHAO X J, *et al.*. The growth and luminescence properties of Y₃Al₅O₁₂: Ce³⁺ single crystal by doping Gd³⁺ for W-LEDs [J]. *Mater. Lett.*, 2016, 170:58-61.
- [84] FENG L G, LI Y F, XIONG H, *et al.*. Freestanding GaN-based light-emitting diode membranes on Y₃Al₅O₁₂: Ce³⁺ crystal phosphor plate for efficient white light emission [J]. *Appl. Phys. Express*, 2016, 9(8):081003-1-3.
- [85] NISHIURA S, TANABE S, FUJIOKA K, *et al.*. Preparation and optical properties of transparent Ce: YAG ceramics for high power white LED [C]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Nagoya, Japan*, 2008:012031.
- [86] NISHIURA S, TANABE S, FUJIOKA K, *et al.*. Properties of transparent Ce: YAG ceramic phosphors for white LED [J]. *Opt. Mater.*, 2011, 33(5):688-691.
- [87] NISHIURA S, TANABE S, FUJIOKA K, *et al.*. Preparation of transparent Ce³⁺: GdYAG ceramics phosphors for white LED [C]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Nagoya, Japan*, 2011:102005.
- [88] NISHIURA S, TANABE S, FUJIOKA K, *et al.*. Transparent Ce³⁺: GdYAG ceramic phosphors for white LED [J]. *Proceedings of SPIE, Optical Components and Materials VIII, California*, 2011:793404.
- [89] WEI N A, LU T C, LI F, *et al.*. Transparent Ce: Y₃Al₅O₁₂ ceramic phosphors for white light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(6):061902.
- [90] RAUKAS M, KELSO J, ZHENG Y, *et al.*. Ceramic phosphors for light conversion in LEDs [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2012, 2(2):R3168-R3176.
- [91] LIU G H, ZHOU Z Z, SHI Y, *et al.*. Ce: YAG transparent ceramics for applications of high power LEDs: thickness effects and high temperature performance [J]. *Mater. Lett.*, 2015, 139:480-482.
- [92] LIU X, ZHOU H Y, HU Z W, *et al.*. Transparent Ce: GdYAG ceramic color converters for high-brightness white LEDs and LDs [J]. *Opt. Mater.*, 2019, 88:97-102.
- [93] HU S, LU C H, ZHOU G H, *et al.*. Transparent YAG: Ce ceramics for WLEDs with high CRI: Ce³⁺ concentration and sample thickness effects [J]. *Ceram. Int.*, 2016, 42(6):6935-6941.
- [94] LIU Y L, HU S, ZHANG Y L, *et al.*. Crystal structure evolution and luminescence property of Ce³⁺-doped Y₂O₃-Al₂O₃-Sc₂O₃ ternary ceramics [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2020, 40(3):840-846.
- [95] FENG S W, QIN H M, WU G Q, *et al.*. Spectrum regulation of YAG: Ce transparent ceramics with Pr, Cr doping for white light emitting diodes application [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2017, 37(10):3403-3409.
- [96] TANG Y R, ZHOU S M, YI X Z, *et al.*. The characterization of Ce/Pr-doped YAG phosphor ceramic for the white LEDs [J]. *J. Alloys Compd.*, 2018, 745:84-89.
- [97] TIAN Y N, TANG Y R, YI X Z, *et al.*. The analyses of structure and luminescence in (Mg_yY_{3-y}) (Al_{5-y}Si_y)O₁₂ and Y₃(Mg_xAl_{5-2x}Si_x)O₁₂ ceramic phosphors [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020, 813:152236.
- [98] ZHANG L, SUN B H, GU L C, *et al.*. Enhanced light extraction of single-surface textured YAG: Ce transparent ceramics for high power white LEDs [J]. *Appl. Surface Sci.*, 2018, 455:425-432.
- [99] SUN B H, ZHANG L, ZHOU T Y, *et al.*. Protected-annealing regulated defects to improve optical properties and luminescence performance of Ce: YAG transparent ceramics for white LEDs [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(14):4057-4065.
- [100] CHEN J, DENG Z H, LIU Z G, *et al.*. Optical enhancement brought by doping Gd³⁺ ions into Ce: YAG ceramics for indoor white light-emitting diodes [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(7):A292-A298.
- [101] ISHIKAWA T, SAKATA S I, MITANI A, *et al.*. Durable, ultraluminous structure for incandescent, high-power white-LED [J]. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2006, 3(2):144-149.
- [102] SELIM F A, KHAMEHCHI A, WINARSKI D, *et al.*. Synthesis and characterization of Ce: YAG nano-phosphors and

- ceramics [J]. *Opt. Mater. Express*, 2016,6(12):3704-3715.
- [103] LIU Y F, LIU S, SUN P, *et al.*. Transparent ceramics enabling high luminous flux and efficacy for the next-generation high-power LED light [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019,11(24):21697-21701.
- [104] 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.
- [105] 贺龙飞, 范广涵, 雷牧云, 等. 白光 LED 用新型 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 透明陶瓷的发光性能 [J]. *发光学报*, 2013, 34(2):133-138.
- HE L F, FAN G H, LEI M Y, *et al.*. Luminescent properties of new $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ transparent ceramics for white LED applications [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013,34(2):133-138. (in Chinese)
- [106] 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.
- [107] 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.
- [108] ZHANG X J, SI S C, YU J B, *et al.*. Improving the luminous efficacy and resistance to blue laser irradiation of phosphor-in-glass based solid state laser lighting through employing dual-functional sapphire plate [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(2):354-361.
- [109] ZHANG D, XIAO W G, LIU C, *et al.*. Highly efficient phosphor-glass composites by pressureless sintering [J]. *Nat. Commun.*, 2020,11:2805.
- [110] XU J, LIU B G, LIU Z W, *et al.*. Design of laser-driven $\text{SiO}_2\text{-YAG}:\text{Ce}$ composite thick film: facile synthesis, robust thermal performance, and application in solid-state laser lighting [J]. *Opt. Mater.*, 2018,75:508-512.
- [111] 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.
- [112] 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.
- [113] MOU Y, WANG H, LIANG D D, *et al.*. Efficient and heat-conducting color converter of phosphor glass film printed on sapphire substrate for high-power white LEDs/LDs [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2019,515:98-105.
- [114] WU H J, HAO Z D, PAN G H, *et al.*. Phosphor- SiO_2 composite films suitable for white laser lighting with excellent color rendering [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2020,40(6):2439-2444.
- [115] PENG Y, MOU Y, WANG H, *et al.*. Stable and efficient all-inorganic color converter based on phosphor in tellurite glass for next-generation laser-excited white lighting [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2018,38(16):5525-5532.
- [116] XU J, HU B F, XU C, *et al.*. Carbon-free synthesis and luminescence saturation in a thick $\text{YAG}:\text{Ce}$ film for laser-driven white lighting [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2019,39(2-3):631-634.
- [117] PARK J, KIM J, KWON H. Phosphor-aluminum composite for energy recycling with high-power white lighting [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017,5(19):1700347-1-6.
- [118] PARK J, CHO S, KWON H. Aluminum-ceramic composites for thermal management in energy-conversion systems [J]. *Sci. Rep.*, 2018,8:17852.
- [119] WANG H, MOU Y, PENG Y, *et al.*. Fabrication of phosphor glass film on aluminum plate by using lead-free tellurite glass for laser-driven white lighting [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020,814:152321.
- [120] ARJOCA S, VÍLLORA E G, INOMATA D, *et al.*. $\text{Ce}:(\text{Y}_{1-x}\text{Lu}_x)_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ single-crystal phosphor plates for high-brightness white LEDs/LDs with high-color rendering ($R_a > 90$) and temperature stability [J]. *Mater. Res. Express*, 2014, 1(2):025041.
- [121] VÍLLORA E G, ARJOCA S, INOMATA D, *et al.*. Single-crystal phosphors for high-brightness white LEDs/LDs [C]. *Proceedings of SPIE, Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XX, San Francisco*, 2016:976805.
- [122] 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.

- [123] 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.
- [124] SONG Y H, JI E K, JEONG B W, *et al.*. High power laser-driven ceramic phosphor plate for outstanding efficient white light conversion in application of automotive lighting [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 31206-1-7.
- [125] 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.
- [126] 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.
- [127] 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.
- [128] MA Y L, ZHANG L, ZHOU T Y, *et al.*. Weak thermal quenching and tunable luminescence in Ce: Y₃(Al, Sc)₅O₁₂ transparent ceramics for high power white LEDs/LDs [J]. *Chem. Eng. J.*, 2020, 398: 125486.
- [129] LI S X, ZHU Q Q, TANG D M, *et al.*. Al₂O₃-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.
- [130] SONG Y H, JI E K, JEONG B W, *et al.*. Design of laser-driven high-efficiency Al₂O₃/YAG: Ce³⁺ ceramic converter for automotive lighting: fabrication, luminous emittance, and tunable color space [J]. *Dyes Pigments*, 2017, 139: 688-692.
- [131] 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.
- [132] LIU Z H, LI S X, HUANG Y H, *et al.*. Composite ceramic with high saturation input powder in solid-state laser lighting: microstructure, properties, and luminous emittances [J]. *Ceram. Int.*, 2018, 44(16): 20232-20238.
- [133] LIU Z H, LI S X, HUANG Y H, *et al.*. The effect of the porosity on the Al₂O₃-YAG: Ce phosphor ceramic: microstructure, luminescent efficiency, and luminous stability in laser-driven lighting [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 785: 125-130.
- [134] 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.
- [135] ZHU Q Q, MENG Y, ZHANG H, *et al.*. YAGG: Ce phosphor-in-YAG ceramic: an efficient green color converter suitable for high-power blue laser lighting [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2020, 2(8): 2644-2650.
- [136] 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.
- [137] PARK Y J, KIM S W, KIM C J, *et al.*. Development of β -SiAlON: Eu²⁺ phosphor in glass for high-power LED- and LD-based lighting systems using original BaO-B₂O₃-ZnO-SiO₂ (BBZS) composition glass [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 794: 94-100.
- [138] 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.
- [139] KANGT W, PARK K W, RYU J H, *et al.*. Strong thermal stability of Lu₃Al₅O₁₂: Ce³⁺ single crystal phosphor for laser lighting [J]. *J. Lumin.*, 2017, 191: 35-39.
- [140] KRASNOSHCHOKA A, THORSETH A, DAM-HANSEN C, *et al.*. Investigation of saturation effects in ceramic phosphors for laser lighting [J]. *Materials*, 2017, 10(12): 1407-1-9.
- [141] XU J, WANG J, GONG Y X, *et al.*. Investigation of an LuAG: Ce translucent ceramic synthesized *via* spark plasma sintering: towards a facile synthetic route, robust thermal performance, and high-power solid state laser lighting [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2018, 38(1): 343-347.
- [142] 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.
- [143] ZHANG Q, ZHENG R L, DING J Y, *et al.*. Excellent luminous efficiency and high thermal stability of glass-in-LuAG ceramic for laser-diode-pumped green-emitting phosphor [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(15): 3566-3569.
- [144] HUANG Y F, CHI U C, CHENG C H, *et al.*. LuAG: Ce/CASN: Eu phosphor enhanced high-CRI R/G/B LD lighting fidelity [J]. *J. Mater. Chem. C.*, 2019, 7: 9556.
- [145] LI K, SHI Y, JIA F Q, *et al.*. Low etendue yellow-green solid-state light generation by laser-pumped LuAG: Ce ceramic

- [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2018,30(10):939-942.
- [146] YOU S H, LI S X, JIA Y C, *et al.*. Interstitial site engineering for creating unusual red emission in $\text{La}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}:\text{Ce}^{3+}$ [J]. *Chem. Mater.*, 2020,32(8):3631-3640.
- [147] 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 Photon. Rev.*, 2019,13(2):1800216-1-10.
- [148] NITTA M, NAGAO N, NOMURA Y K, *et al.*. High-brightness red-emitting phosphor $\text{La}_3(\text{Si}, \text{Al})_6(\text{O}, \text{N})_{11}:\text{Ce}^{3+}$ for next-generation solid-state light sources [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020,12(28):31652-31658.
- [149] LIU G, TIAN Z F, CHEN Z H, *et al.*. $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ phosphors bonding with bismuth borate glass for high power light excitation [J]. *Opt. Mater.*, 2015,40:63-67.
- [150] LI S X, ZHU Q Q, WANG L, *et al.*. $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ 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.
- [151] LI S X, TANG D M, TIAN Z F, *et al.*. New insights into the microstructure of translucent $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ phosphor ceramics for solid-state laser lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017,5(5):1042-1051.
- [152] ZHU Q Q, XU X, WANG L, *et al.*. A robust red-emitting phosphor-in-glass (PiG) for use in white lighting sources pumped by blue laser diodes [J]. *J. Alloys Compd.*, 2017,702:193-198.
- [153] XU J, YANG Y, GUO Z Q, *et al.*. Design of a $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}$ /glass composite film: facile synthesis, high saturation-threshold and application in high-power laser lighting [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2020,40(13):4704-4708.
- [154] ZHANG Y J, ZHANG Z L, LIU X D, *et al.*. A high quantum efficiency $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ phosphor-in-glass with excellent optical performance for white light-emitting diodes and blue laser diodes [J]. *Chem. Eng. J.*, 2020,401:125983.
- [155] 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.
- [156] TANG Y, LIANG Y F, DING X R, *et al.*. A laser-driven phosphor converted system with enhanced optical efficiency by using light-recycling dichroic filters [J]. *J. Lumin.*, 2020,223:117180.



胡盼(1997 -),女,湖北鄂州人,硕士研究生,2019年于长春理工大学获得学士学位,主要从事激光照明与显示用荧光陶瓷的研究。
E-mail: hupan@nimte.ac.cn



刘永福(1985 -),男,江苏丰县人,博士,副研究员,硕士研究生导师,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事稀土发光材料物理、透明功能陶瓷及应用的研究。
E-mail: liuyongfu@nimte.ac.cn

青年编委介绍:

刘永福,副研究员,硕士研究生导师,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得凝聚态物理博士学位;2014年至今就职于中国科学院宁波材料技术与工程研究所,先后担任博士后/助理研究员、副研究员;2019年入选“春蕾”副研究员、“宁波市领军和拔尖人才培养工程”。主要从事稀土发光材料、荧光粉和透明荧光陶瓷、LED和激光(LD)照明器件的研究。主持国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金、博士后一等资助和特别资助、浙江省公益技术项目、宁波市自然科学基金等课题,作为核心成员参与国家科技支撑计划项目、工信部稀土专项、中国科学院海西创新研究院部署项目等多个课题。研究成果多以第一作者及通讯作者在 *Adv. Mater.*, *Light: Sci. Appl.*, *Adv. Optical Mater.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, *J. Mater. Chem. C*, *Chem. Commun.* 等期刊发表SCI学术论文59篇;申请国家专利26项,已授权13项;研究工作入选2017年度中国稀土十大科技新闻,2017—2018年度宁波市自然科学优秀论文C等奖。培养指导10名硕士研究生,其中7人已毕业;协助培养1名博士研究生。担任《发光学报》青年编委。