

# 激光照明与显示用荧光材料研究进展

王 芬, 王 丹

(北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029)

**摘 要:** 基于激光二极管的照明与显示技术具有光束聚焦性强、准直性好以及高功率光效稳定等优点, 在汽车照明、深海照明、内窥镜等特种照明及激光电视等高端显示产品领域有广阔的应用前景。综述了激光照明与显示用关键配套荧光材料研究的最新进展, 首先介绍了基于激光二极管的照明与显示器件结构以及针对荧光材料发光饱和及光提取效率性能提升的设计及优化策略, 重点阐述了荧光单晶、荧光陶瓷、荧光玻璃、荧光薄膜等典型材料制备和器件应用性能的比较, 最后结合作者团队在发光材料与器件领域的研究工作基础, 对相关领域的未来研究方向进行了展望。

**关键词:** 激光照明与显示; 荧光单晶; 荧光陶瓷; 荧光玻璃; 荧光薄膜; 纳米粉体

**中图分类号:** TB33; TN312<sup>+</sup>.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)04-0289-07

**引用格式:** 王芬, 王丹. 激光照明与显示用荧光材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(4): 289-295.

WANG F, WANG D. Progress of Phosphor Materials for Laser Lighting and Display[J]. Materials China, 2023, 42(4): 289-295.

## Progress of Phosphor Materials for Laser Lighting and Display

WANG Fen, WANG Dan

(State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology,  
Beijing 100029, China)

**Abstract:** Lighting and display technology based on laser diodes have found many applications in automobile lamp, deep sea lighting, endoscope and laser television for the advantages of finely focused laser beam, good collimation and no “efficiency drop” under high power. In this paper, the typical research progress of phosphor materials for laser lighting and display is reviewed. Firstly, the structure of lighting and display devices based on laser diodes and the material design and optimization strategies based on phosphor materials luminescence saturation and light extraction efficiency improvement are introduced. The preparation and comprehensive performance comparison of device application of phosphor single crystal, phosphor ceramics, phosphor in glasses, phosphor films and other materials are emphasized. Finally, combined with the research foundation of our team in the field of luminescent materials and devices, the future research direction of related fields is proposed.

**Key words:** laser lighting and display; single crystal phosphor; phosphor ceramics; phosphor in glasses; phosphor films; nanopowders

## 1 前 言

基于电子-光子转化的电力照明和显示产品作为现代人类生活的必需品, 在过去的 100 余年里经历了快速的发展。近年来, 以发光二极管(light-emitting diodes, LEDs)

为代表的固态照明与显示技术产品, 在家庭照明、植物照明、液晶背光源、投影显示等领域发挥着重要作用。然而, 传统的 LEDs 芯片元件受限于俄歇复合, 随着驱动电流的增加会出现“效率滚降”现象, 导致其激发功率难以提高<sup>[1]</sup>, 极大地限制了它在超高亮度和超大功率照明及显示场景的应用。激光是指通过受激辐射而产生、放大的光(light amplification by stimulated emission of radiation, LASER), 激光中的光子光学特性高度一致, 因此激光具有单色性好、方向性好、亮度高的特性<sup>[2]</sup>。基于激光二极管(laser diodes, LDs)的激光照明与显示器件, 其芯片的发光来自于受激发射, 在高功率时无“效率滚

收稿日期: 2022-06-15 修回日期: 2022-07-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(JD2202, BUCTR202016)

第一作者: 王 芬, 女, 1997 年生, 博士研究生

通讯作者: 王 丹, 男, 1988 年生, 教授, 博士生导师,

Email: wangdan@mail.buct.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202206010

降”现象,且具有尺寸小、光束小、准直性好等优点,在汽车照明<sup>[3]</sup>、深海照明<sup>[4]</sup>、内窥镜<sup>[5]</sup>等特种照明领域以及激光电视<sup>[6]</sup>等高端显示领域展现出广阔的市场应用潜力,是信息产业未来的重点发展方向之一。

激光照明与显示产品高性能化的关键,就是通过材料与器件的集成创新,实现分子到纳微尺度至宏观尺度上电子向光子转换的最优化,其中涉及多学科交叉的科学问题。色度调节是激光照明与显示系统面临的首要关键问题,此外,相比于普通 LED,由于激光光源能量密度提升和高度聚焦,热效应问题也是激光照明与显示系统中困扰荧光材料、泵浦源正常工作的另一问题。为解决以上问题,对激光照明与显示器件核心配套的荧光材料以及材料的封装方式提出了更高要求<sup>[7]</sup>。国内外学者面向激光照明与显示器件对荧光材料高热导性、高热稳定性及强散射的实际需求,发展了以荧光陶瓷<sup>[8-10]</sup>、荧光玻璃<sup>[11]</sup>、荧光单晶<sup>[12-16]</sup>、荧光薄膜<sup>[17-19]</sup>等为代表的一系列新型荧光材料。本文综述激光照明与显示用荧光材料的最新研究进展,首先介绍了基于 LDs 的照明与显示器件的结构以及针对荧光材料发光饱和阈值及光提取效率低等问题的设计及优化策略,重点阐述荧光单晶、荧光陶瓷、荧光玻璃、荧光薄膜等典型荧光材料制备和器件应用性能的比较,并结合作者团队在发光材料与器件领域的研究工作基础,提出未来可进一步探索的激光照明与显示用荧光材料的研究方向。

## 2 器件设计及荧光材料优化策略

### 2.1 器件结构

激光照明与显示器件主要包括激光器、光转换材料和光学系统 3 部分, LD 光源通过聚焦透镜形成更小的光束,部分蓝色 LD 光源经光转换材料发出黄光,剩余蓝光和黄光分别通过透镜整形,混合形成平行白光输出。相比于 LED 光源, LD 光源不存在“效率滚降”效应,且具有更高效率、更强亮度、更小尺寸及可远距离照射的特点<sup>[20, 21]</sup>。传统的半导体固态照明与显示器件是通过将荧光粉分散在有机封装胶中,并使用点胶机将复合材料涂敷在芯片上进行封装<sup>[22]</sup>。由于 LDs 的功率密度远大于 LEDs,易产生高热负荷,而传统有机封装胶的热导性 ( $0.1 \sim 0.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 及热稳定性较差,导致废热无法快速释放,将会使荧光粉发生严重的发光饱和,因此传统的半导体器件封装技术难以满足高性能激光照明产品的应用需求。激光照明与显示器件使用高导热荧光材料搭配如图 1 所示的远程封装方式(包括透射和反射两种器件架构)<sup>[23]</sup>,可以使器件的散热能力大大增强,大功率、高亮度的器件仍具有较强的稳定性。透射模式中蓝色激

光能够穿透荧光材料,部分转换为黄光,并与剩余未转换的蓝光混合形成白光,该模式要求粘合层也必须是透明的高导热材料;反射模式中激光方向与透射模式不同,荧光材料具有高反射背面,来源于同侧的蓝色激光通过荧光材料部分转换为黄光,与未转换的蓝光一同反射混合形成白光。虽然透射模式架构更简单紧凑,但反射模式架构中荧光材料可以与散热器集成,在高功率和高亮度器件中具有更为优越的发光效率和颜色稳定性。

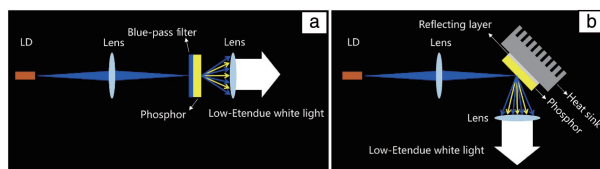


图 1 基于荧光转换的白光激光照明器件结构示意图<sup>[23]</sup>: (a) 透射模式, (b) 反射模式

Fig. 1 Structure schematic of the phosphor-converted white-laser diode in<sup>[23]</sup>: (a) transmission mode, (b) reflection mode

### 2.2 发光饱和

发光饱和是指当激光功率密度增大到一定程度后,荧光材料的光通量不再升高甚至会降低的现象,分为热饱和和光饱和 2 种,其中光饱和主要与发光中心的浓度和衰减时间相关。从产品工程化角度分析,发光颗粒单元材料的制备,要求批次产物的基质颗粒尺寸分布窄,并且掺杂离子在基质颗粒中浓度均匀,以保证产品的质量稳定性和性能一致性(图 2)<sup>[24]</sup>。对于激光照明与显示器件来说,热饱和是实现高亮度和高光通的主要障碍,荧光材料被激光照射到的区域会产生大量的热量,致使荧光材料发生热淬灭。例如, Xu 等<sup>[25]</sup>研究了 Ce 掺杂石榴石基荧光陶瓷的化学组成和几何结构在热量产生、耗散和耐热性方面对饱和阈值的影响,可知材料的温度会随着激光功率密度增加而升高,而材料的几何形状对其产热和散热能力都具有一定的影响,热量产生与消散之间的竞争效应将会导致复杂的热饱和现象。因此,可通过改变荧光材料化学组成<sup>[24, 25]</sup>、引入高热导率的第二相<sup>[26, 27]</sup>、搭配高热导率基板<sup>[18]</sup>等方法,减少产热、提高散热和热稳定性来提高荧光材料的发光饱和阈值。

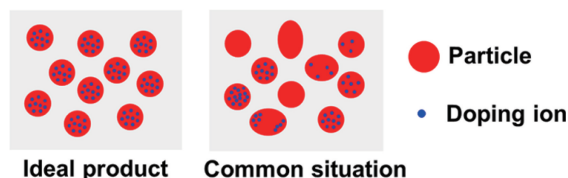


图 2 掺杂型发光颗粒理想产品和实际产物结构示意图<sup>[24]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of the ideal product and common situation of ion-doped luminescent particles<sup>[24]</sup>

## 2.3 光提取

激光光源的高度聚集特性对荧光材料的散射强度提出了更高的要求。如图 3a 所示<sup>[28]</sup>, 无散射中心时, 激光光源发出的光易直接穿透荧光材料, 光致发光转换率低, 光均匀性差。同时, 由于荧光材料与空气的折射率差异较大导致部分转换光产生很强的全内反射, 降低了发光中心的光提取效率<sup>[7]</sup>。因此, 通过增加一定数量的散射中心, 可以改变光在荧光材料中的传播路径, 有利于增加激光的吸收效率和提取效率, 并充分混合入射激光与转换光, 实现激光照明用荧光材料的高性

能化。荧光材料增强散射的方法主要包括引入不发光的第二相<sup>[26, 29, 30]</sup>、引入气孔<sup>[7, 28]</sup>、增加表面粗糙度等。例如, Zhu 等<sup>[29]</sup>采用未掺杂 Ce 的钇铝石榴石( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , YAG)作为第二相, 与 YAG:Ce 形成 YAG:Ce-YAG 复相陶瓷, 发现该复相陶瓷内的散射中心使之在被蓝色激光照射时表现出较 YAG:Ce 单相陶瓷更高的转换效率及更优异的光均匀性(图 3b 和 3c)。此外, 将高热导率的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等材料作为第二相掺杂入荧光材料中, 在提高材料光学性能的同时, 能够有效增强其散热性<sup>[26, 30]</sup>。

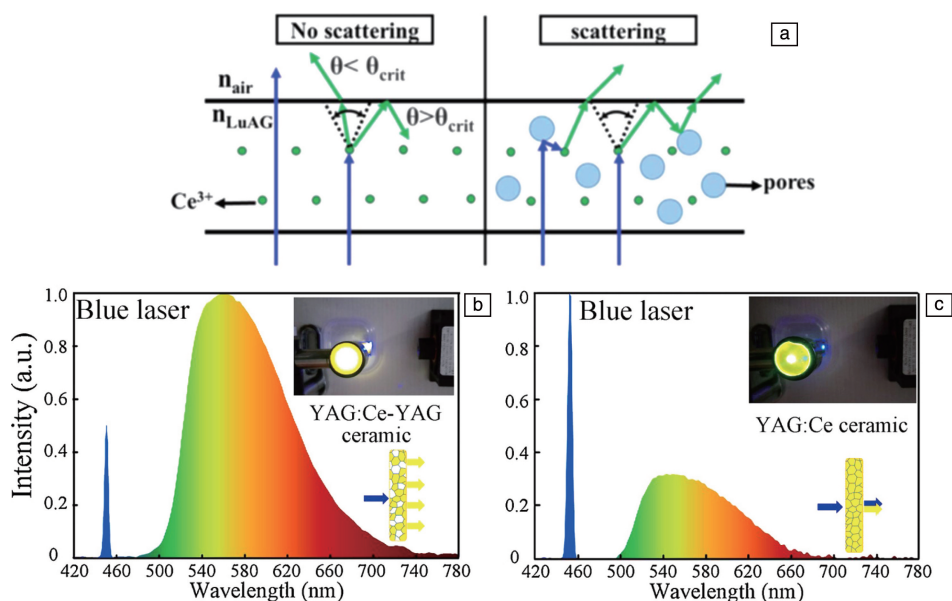


图3 有无散射中心时光在陶瓷中的传播示意图(a)<sup>[28]</sup>, 蓝色激光照射下复相 YAG:Ce-YAG 陶瓷(b)和单相 YAG:Ce 陶瓷(c)的光学性能<sup>[29]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram showing light propagation in ceramics with and without scattering (a)<sup>[28]</sup>, luminescent properties of the complex-phase YAG:Ce-YAG ceramic (b) and the single-phase YAG:Ce ceramic (c) under the excitation of a blue laser diode<sup>[29]</sup>

## 3 典型材料制备及器件性能

### 3.1 荧光单晶

荧光粉是由大量小单晶颗粒组成的集体, 呈现出粉末状态。而荧光单晶的整个颗粒是一个完整且一致的晶格, 结晶度高、缺陷少, 内量子效率非常高。荧光单晶无需使用有机封装胶进行封装, 其热导率能够比有机封装胶封装后的荧光粉高出 2 个数量级, 在 300 °C 下仍具有优异的热稳定性<sup>[12, 16, 31]</sup>。石榴石基晶体是最经典的激光照明与显示用荧光单晶材料。例如, Park 等<sup>[14]</sup>以  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CeO}_2$  为原料粉体, 采用区熔法在 1500 °C 下制备了 YAG:Ce 黄色荧光单晶, 并比较了块状荧光单晶和其粉碎后的性能。结果表明, 相比于粉碎的荧光单晶, 块状荧光单晶具有较弱的发光温度依赖性, 且在蓝色

LDs 驱动下温度升高现象较轻(图 4)。使用其它离子取代 YAG 晶体中阳离子的位置可以改变 Ce 所处的晶格环境, 从而影响  $\text{Ce}^{3+}$  的发射峰位置, 如 Gd, Lu 等离子可以取代晶体中 Y 的位置, 当取代离子的离子半径较 Y 大时, 可使其发射发生红移, 改善照明光源缺乏红光成分的问题, 提高显色指数。由于人眼对绿光比红光和蓝光更敏感, 所以提高绿光强度是提高显示器整体亮度的有效方法<sup>[13]</sup>。此外, 一些研究通过制备红光荧光单晶并与 YAG:Ce 配合使用且获得了显色指数高、色温低的光源<sup>[16, 32]</sup>。

### 3.2 荧光陶瓷

与单晶(晶体材料)和无定形相(玻璃材料)不同, 荧光陶瓷是一种晶粒相互连接的多晶材料, 其微观结构如图 5a 所示<sup>[33]</sup>, 荧光陶瓷具有与单晶几乎相同的物理化学性质、光谱特性和激光性能, 且制备周期短、成本低、



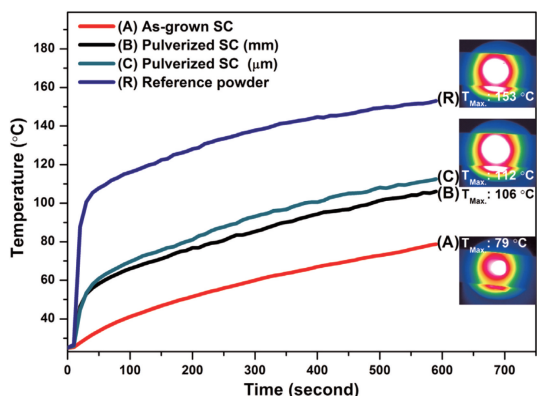


图 4 光功率为 5 W 的 450 nm 蓝色激光二极管的激光照射点处块状和粉碎的 YAG :Ce<sup>3+</sup> 荧光单晶的热成像光谱, 插图显示了块状荧光单晶 (A)、粉碎的荧光单晶 (C) 和商业粉末 (R) 的热成像照片<sup>[14]</sup>

Fig. 4 Thermograph spectra of the as-grown and the pulverized single crystal YAG :Ce<sup>3+</sup> phosphors at the laser-irradiated spot of 450 nm blue laser diode with an optical power of 5 W as a function of time, inset shows thermograph images of the as-grown single crystal phosphors (A), the pulverized single crystal phosphors (C), and reference powder (R)<sup>[14]</sup>

形状容易控制, 在激光照明领域极具潜力。照明用荧光陶瓷的研究以发光材料体系进行分类, 主要可以分为钇铝石榴石体系、氮化物体系和多铝酸盐体系。目前最成熟的荧光陶瓷是立方晶系钇铝石榴石体系, 制备方法主要包括 2 条路线: ① 以高纯、高烧结活性的氧化物粉体为原料<sup>[7, 9]</sup>, 采用固相反应结合烧结技术制备; ② 先合成高烧结活性的纳米荧光粉体<sup>[34, 35]</sup>, 再结合烧结技术制备。陶瓷材料中的晶界、缺陷(气孔、杂质等)以及晶粒等会对入射光线的吸收、反射、散射等产生一定的影响, 相比于荧光单晶, 其散射调控的灵活度更高, 可通过引入不发光的第二相<sup>[26, 29, 30]</sup>、引入气孔<sup>[7, 28]</sup>、增加表面粗糙度等方式增强散射, 提高光提取效率和光均匀性。例如, Zheng 等<sup>[7]</sup>通过将球型聚甲基丙烯酸甲酯作为造孔剂掺入原料粉体中, 引入气孔增强材料的散射, 烧制得到的高孔隙率荧光陶瓷(图 5b)展现出高亮度和光均匀性, 但散射的增强也会降低陶瓷的透光性(图 5c)。控制晶粒尺寸减少晶界是使陶瓷透明化的方法, Yao 等<sup>[9]</sup>以纳米级 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为原料, 并同时引入纳米 SiO<sub>2</sub> 和 MgO 控制缺陷, 制备得到了图 5d 中透光率接近 80% 的荧光透明陶瓷。除了采用改变陶瓷基质、调整发光中心等

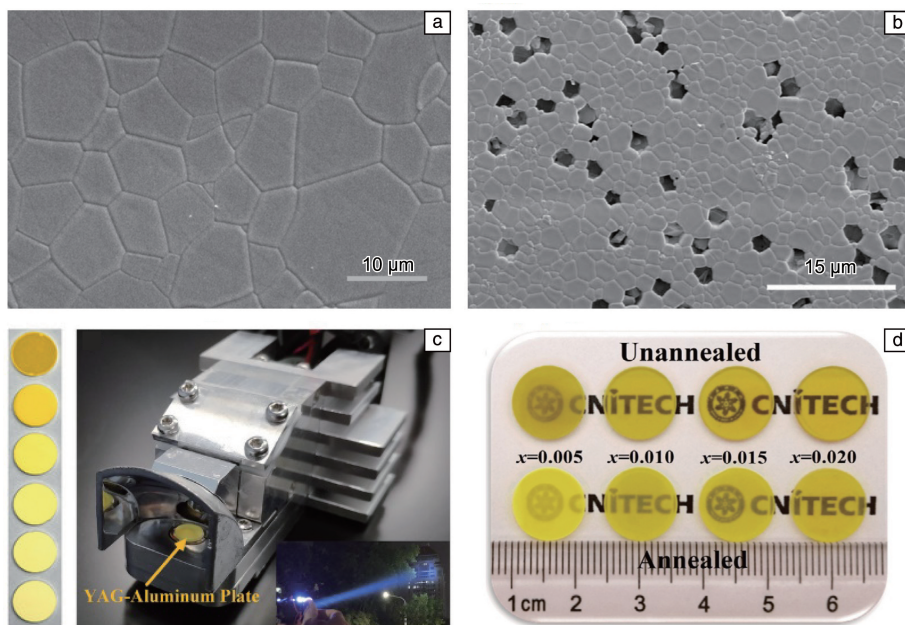


图 5 0.3at% Ce :YAG 透明陶瓷热蚀蚀表面的 FE-SEM 显微组织照片 (a)<sup>[33]</sup>; 添加聚甲基丙烯酸甲酯作为造孔剂的 YAG :Ce 透明陶瓷表面的 SEM 照片 (b), 从上到下气孔率增加 YAG 的照片 (左) 和使用 YAG-Al 板的激光驱动灯的照片 (右) (c)<sup>[7]</sup>; YAG :0.5%Ce+xMS 透明荧光陶瓷 ( $x=0.005, 0.01, 0.015$  和  $0.02$ ) 在日光下的照片 (d)<sup>[9]</sup>

Fig. 5 FE-SEM microstructure image of the thermally etched surfaces of 0.3at% Ce :YAG transparent ceramics (a)<sup>[33]</sup>; surface SEM image of YAG :Ce added polymethyl methacrylate as pore-forming agents (b), photographs of YAG, porosity increasing from top to bottom (left) and a laser-driven lamp by using the YAG-Al plate (right) (c)<sup>[7]</sup>; images of YAG :0.5%Ce+xMS transparent ceramic plates ( $x=0.005, 0.01, 0.015$ , and  $0.02$ ) under day light (d)<sup>[9]</sup>



措施对单一陶瓷进行调整以提高 LD 照明器件显色指数外, 通过黄色/绿色/红色的组合也能够改善光源的颜色质量, 绿色荧光陶瓷包括石榴石结构和尖晶石结构, 其中  $\text{LuAG:Ce}^{3+}$ 、 $\text{Y}_3\text{Al}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ -YAG<sup>[37]</sup> 为石榴石结构,  $\text{Ba}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ <sup>[38]</sup> 为尖晶石结构; 红色荧光陶瓷包括  $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ <sup>[39]</sup> 等氮化物, 在高功率激光照明时均表现出优异性能。

### 3.3 荧光玻璃

荧光玻璃是一种将荧光粉与玻璃材料复合形成的无机材料<sup>[11]</sup>, 比传统有机封装材料具有更高的热导率和耐热性<sup>[40]</sup>。荧光玻璃中所用到的荧光粉与以上 2 种材料体系基本相同, 主要分为氧化物<sup>[41]</sup>及氮(氧)化物<sup>[11, 42]</sup> 2 大体系, 目前已实现黄色<sup>[43]</sup>、绿色<sup>[42]</sup>、红色<sup>[11]</sup> 发射。相比于荧光单晶和荧光陶瓷, 荧光玻璃能够在低温下合成( $<800\text{ }^\circ\text{C}$ ), 大大降低了生产成本<sup>[11]</sup>, 更容易实现大规模生产。通过开发低玻璃化转变温度( $T_g$ )的玻璃材料, 能够进一步降低材料的成型温度, 提高材料的发光效率<sup>[40, 42]</sup>。除生产成本低、形状易控制等优势外, 荧光玻璃还可以实现多种荧光粉嵌入<sup>[41, 44]</sup>, 方便地调节荧光粉浓度, 从而实现光源色度可调。例如, Muniz 等<sup>[43]</sup> 通过将发黄光的 YAG: $\text{Ce}^{3+}$  荧光粉和发红光的 Eu 掺杂钠钙硅酸盐玻璃协同络合, 成功合成了高效的白光荧光玻璃(phosphor-in-glass, PiG), 使用蓝光芯片激发该荧光玻璃时效果如图 6 所示, 显色指数较单种荧光粉提高了 30%。

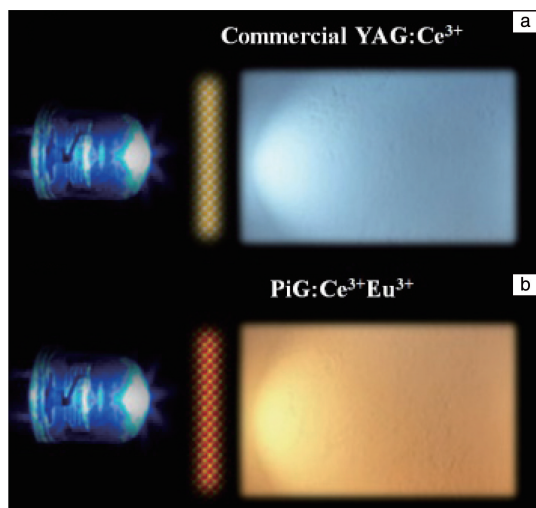


图 6 蓝色 LED 芯片分别与商用 YAG: $\text{Ce}^{3+}$  (a) 和 PiG: $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$  (b) 耦合形成背光白光 LED 器件示意图<sup>[43]</sup>

Fig. 6 Schematic representation of back-lighting white LED device with a blue LED chip coupled to commercial YAG: $\text{Ce}^{3+}$  (a) and PiG: $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$  (b)<sup>[43]</sup>

### 3.4 荧光薄膜

虽然相比于其他 2 种荧光材料, 荧光玻璃能够通过

相对简单的工艺制备, 但该荧光玻璃存在两个严重的问题: 可承受的激光功率密度低、玻璃基体导热性差<sup>[17]</sup>。荧光薄膜是指在高导热衬底上镀上荧光粉制备的一层薄膜材料, 制备工艺简单、烧结温度低, 在激光照明与显示器件应用中展现出优良的热稳定性和高量子效率。常用的基板包括玻璃基板、铝基板、蓝宝石基板<sup>[17-19, 30]</sup>等, 其中蓝宝石基板具有约  $30\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  的高热导率, 在荧光薄膜中应用广泛。Wu 等<sup>[17]</sup> 选用硅溶胶作为无机粘合剂, 将该粘合剂与荧光粉混合后通过简单的刮刀涂布工艺涂覆到蓝宝石基板上, 制备得到如图 7a~7d 所示的复合材料, 此方法只需要在  $500\text{ }^\circ\text{C}$  下烧结 30 min。Zheng 等<sup>[19]</sup> 将荧光粉分别与  $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -BaO-ZnO 玻璃粉(黄色与红色 2 种)混合获得粘性浆料, 使用刮刀涂布技术先将黄色 YAG: $\text{Ce}$  的混合粘性浆料涂覆到蓝宝石基板上, 并在黄色涂层上再涂覆一层橙色  $\text{Ca-}\alpha\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$  或红色  $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$  涂层, 获得了高显色指数的 LD 照明器件(图 7e)。Lin 等<sup>[30]</sup> 使用  $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -BaO-ZnO 玻璃粉与绿色  $\text{Y}_3(\text{Al}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  和红色  $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}$  荧光粉混合, 制得了复合浆料并将它涂覆到蓝宝石基板上, 获得了显色指数及色温可调的白光 LD 照明器件, 可应用于舞台聚光灯。

## 4 结 语

激光照明与显示技术的多种优势, 引起了学术界和产业界的广泛关注<sup>[45, 46]</sup>。激光照明技术的发展逐渐走向成熟, 德国宝马公司已推出装备有激光大灯的 i 系列 i8 车型, 并已实现量产, 其照射范围可以达到 600 m, 亮度达到普通 LED 的 5 倍<sup>[2]</sup>。激光显示技术也表现出十足的创新活力和超强的产品力, 我国激光电视产品 2020 年的销售量为 20 余万台, 总销售额约为 46 亿元<sup>[47]</sup>。荧光材料是激光照明与显示产业的上游核心材料。从产业提质增效考虑, 荧光材料在制备过程和性能优化方面仍有待提升。一方面, 荧光材料常用的原料包括 YAG: $\text{Ce}$ 、LuAG: $\text{Ce}$  等荧光粉或高温固相法合成时用到的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Lu}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$  等氧化物粉体, 原料的品质直接影响荧光材料的合成过程及光学性能, 为了获得光学性能优异的荧光材料, 需要高纯、超细、粒径分布窄、分散性好的原料粉体, 可以通过优化前驱体制备过程, 特别是在制备过程中引入基于纳微尺度过程强化技术的新型反应器, 对于提高产品质量和批次稳定性具有重要意义。例如, 作者团队<sup>[24]</sup> 前期采用超重力技术强化液相沉淀过程纳微尺度的混合传质, 制备了发光离子均匀掺杂的  $\text{GdBO}_3:\text{Eu}$  荧光材料, 为高性能荧光材料前驱体制备提供了新思路; 另一方面, 引入散射中心是对

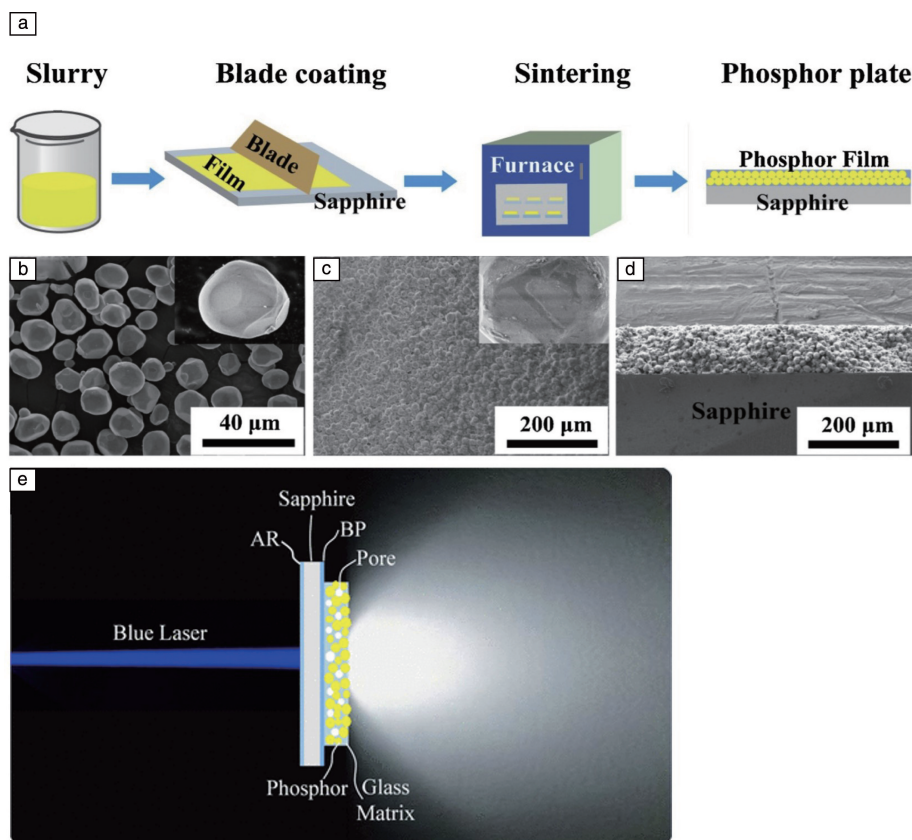


图 7 荧光粉-SiO<sub>2</sub> 复合材料制备过程示意图(a), YAG 荧光粉的 SEM 照片, 插图为 YAG 颗粒的高倍放大照片(b), YAG 荧光薄膜表面(c)和断面(d)SEM 照片<sup>[17]</sup>; 激光驱动白光照明器件的透射架构示意图(e)<sup>[19]</sup>

Fig. 7 Schematic illustration of the preparation process for the phosphor-SiO<sub>2</sub> composite (a), SEM image of the YAG phosphors, inset is the high magnification image of YAG particle (b), top view (c) and cross-sectional view (d) SEM image of YAG based film<sup>[17]</sup>; schematic of the transmissive configuration for laser-driven white light lighting device (e)<sup>[19]</sup>

激光照明与显示用荧光材料进行散射调控常用的方法, 散射中心的折射率、粒径、形状等都会对材料散射强度有一定的影响, 但目前的研究主要通过控制散射中心添加量对散射强度进行调控, 缺少系统性的理论性指导, 而荧光材料烧制是一个需要长时间高温加热的高能耗过程, 若能进一步完善微观结构对材料光学性能、机械性能及热学性能的影响机制, 将有利于快速筛选材料及实验条件, 减少能耗。

#### 参考文献 References

- [1] SHEN Y C, MUELLER G O, WATANABE S, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2007, 91(14): 141101.
- [2] 王丹. 基于荧光纳米粒子的一些生物功能成像研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2013.  
WANG D. Some Studies on Functional Bioimaging Based on Fluorescent Nanoparticles[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013.
- [3] HYING R. 汽车与配件[J], 2014(36): 43-45.  
HYING R. Automobile & Parts[J], 2014(36): 43-45.
- [4] 张辰, 张巍, 董洪斌, 等. 一种用于水下距离选通探测成像的激光照明器; CN205679229U[P/OL]. 2016-11-09.  
ZHANG C, ZHANG W, DONG H B, *et al.* A Laser Illuminator for Underwater Range-Gated Detection Imaging; CN205679229U[P/OL]. 2016-11-09.
- [5] HU Y, MASAMUNE K. Opt Express[J], 2017, 25(14): 16795-16812.
- [6] 陈莉. 电器[J], 2022, 23(5): 70.  
CHEN L. China Appliance[J], 2022, 23(5): 70.
- [7] ZHENG P, LI S, WEI R, *et al.* Laser & Photonics Reviews[J], 2019, 13(10): 1900147.
- [8] HU P, LIU Y, SUN P, *et al.* Materials Research Bulletin[J], 2021, 140: 111297.
- [9] YAO Q, HU P, SUN P, *et al.* Advanced Materials[J], 2020, 32(19): 1907888.
- [10] ZHAO C, DUAN Y, LIN H, *et al.* Ceramics International[J], 2021, 47(7, Part A): 9156-9163.
- [11] ZHU Q Q, XU X, WANG L, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2017, 702: 193-198.
- [12] ARJOCA S, INOMATA D, MATSUSHITA Y, *et al.* CrystEngComm

- [J], 2016, 18(25): 4799–4806.
- [13] KANG T W, PARK K W, RYU J H, *et al.* Journal of Luminescence [J], 2017, 191: 35–39.
- [14] PARK K W, LIM S G, DERESSA G, *et al.* Journal of Luminescence [J], 2015, 168: 334–338.
- [15] ZHOU J, WANG Y, CHEN Y, *et al.* Angewandte Chemie International Edition [J], 2021, 60(8): 3940–3945.
- [16] ZHOU Y, YU C, SONG E, *et al.* Advanced Optical Materials [J], 2020, 8(23): 2000976.
- [17] WU H, HAO Z, PAN G H, *et al.* Journal of the European Ceramic Society [J], 2020, 40(6): 2439–2444.
- [18] XU J, LIU B, LIU Z, *et al.* Optical Materials [J], 2018, 75: 508–512.
- [19] ZHENG P, LI S X, WANG L, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces [J], 2018, 10(17): 14930–14940.
- [20] WIERER J J J, TSAO J Y, SIZOV D S. Laser & Photonics Reviews [J], 2013, 7(6): 963–993.
- [21] WIERER J J J, TSAO J Y. Physica Status Solidi (A) [J], 2015, 212(5): 980–985.
- [22] 何相磊, 蒲源, 王丹, 等. 中国材料进展 [J], 2019, 38(10): 1017–1022.
- HE X L, PU Y, WANG D, *et al.* Materials China [J], 2019, 38(10): 1017–1022.
- [23] XU J, THORSETH A, XU C, *et al.* Journal of Luminescence [J], 2019, 212: 279–285.
- [24] CUI S, HE X, WANG D, *et al.* ACS Omega [J], 2019, 4(11): 14497–14502.
- [25] XU Y, LI S, ZHENG P, *et al.* Journal of Materials Chemistry C [J], 2019, 7(37): 11449–11456.
- [26] WANG J, TANG X, ZHENG P, *et al.* Journal of Materials Chemistry C [J], 2019, 7(13): 3901–3908.
- [27] PENG X, LI S, LIU Z, *et al.* Journal of the European Ceramic Society [J], 2021, 41(11): 5650–5657.
- [28] ZHANG Y, HU S, WANG Z, *et al.* Journal of Luminescence [J], 2018, 197: 331–334.
- [29] ZHU Q Q, LI S, YUAN Q, *et al.* Journal of the European Ceramic Society [J], 2021, 41(1): 735–740.
- [30] LIN T, CHEN H, LI S, *et al.* Chemical Engineering Journal [J], 2022, 444: 136591.
- [31] LIU X, PENG C, ZHANG L, *et al.* Journal of Materials Chemistry C [J], 2022, 10(1): 204–209.
- [32] WANG Z, YANG Z, WANG N, *et al.* Advanced Optical Materials [J], 2020, 8(6): 1901512.
- [33] LI J, SAHI S, GROZA M, *et al.* Journal of the American Ceramic Society [J], 2017, 100(1): 150–156.
- [34] NIEN Y T, TSAI C H, ZHENG R H, *et al.* Ceramics International [J], 2021, 47(13): 18550–18556.
- [35] JING W, LI F, YU S, *et al.* Journal of the European Ceramic Society [J], 2018, 38(5): 2454–2461.
- [36] DING H, LIU Z, HU P, *et al.* Advanced Optical Materials [J], 2021, 9(8): 2002141.
- [37] ZHU Q Q, MENG Y, ZHANG H, *et al.* ACS Applied Electronic Materials [J], 2020, 2(8): 2644–2650.
- [38] SUN J, LIN H, ZHANG D, *et al.* Ceramics International [J], 2019, 45(17, Part B): 23643–23650.
- [39] LI S, ZHU Q, WANG L, *et al.* Journal of Materials Chemistry C [J], 2016, 4(35): 8197–8205.
- [40] LIANG Y, BAO S, ZHANG Y, *et al.* Journal of Materials Chemistry C [J], 2021, 9(37): 12751–12758.
- [41] WANG Z, ZOU J, ZHANG C, *et al.* Journal of Non-Crystalline Solids [J], 2018, 489: 57–63.
- [42] PARK Y J, KIM S W, KIM C J, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2019, 794: 94–100.
- [43] MUNIZ R F, SOARES V O, ZANUTO V S, *et al.* Journal of Non-Crystalline Solids [J], 2021, 574: 121169.
- [44] HUANG P, ZHAO Y, WANG J, *et al.* Journal of the American Ceramic Society [J], 2020, 103(9): 4989–4998.
- [45] LI S, WANG L, HIROSAKI N, *et al.* Laser & Photonics Reviews [J], 2018, 12(12): 1800173.
- [46] 胡盼, 丁慧, 刘永福, 等. 发光学报 [J], 2020, 41(12): 1504–1528.
- HU P, DING H, LIU Y F, *et al.* Chinese Journal of Luminescence [J], 2020, 41(12): 1504–1528.
- [47] 宫学源. 新材料产业 [J], 2021, 323(4): 24–27.
- GONG X Y. Advanced Materials Industry [J], 2021, 323(4): 24–27.

(编辑 费蒙飞)