

## 激光与光电子学进展

面向激光显示应用的窄带绿色  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 微晶玻璃薄膜王鹏飞<sup>1,2,4†</sup>, 林航<sup>1,2,3†\*</sup>, 林世盛<sup>2</sup>, 王元生<sup>2</sup><sup>1</sup>中国福建光电信息科学与技术创新实验室(闽都创新实验室), 福建 福州 350108;<sup>2</sup>中国科学院福建物质结构研究所中国科学院光电材料化学与物理院重点实验室, 福建 福州 350002;<sup>3</sup>东华大学先进玻璃制造技术教育部工程研究中心, 上海 201620;<sup>4</sup>福建师范大学化学与材料学院, 福建 福州 350007

**摘要** 绿光转换材料是激光投影显示的核心部件,然而目前适用于高品质激光显示的高性能窄带绿光转换材料仍较为短缺。为此,将商用窄带绿色  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉与基于新型玻璃组分的低熔点玻璃以薄膜形式共烧结在蒸镀一维光子晶体膜的高导热蓝宝石基片上,形成一体化微晶玻璃薄膜复合材料。研究表明,经低温共烧  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 受玻璃组分热侵蚀不显著,复合材料荧光内量子效率为 55%,半峰全宽为 54 nm,150 °C 时荧光积分强度仍保持室温下的 90% 左右;一维光子晶体膜大幅增强了绿光前向发射强度约 1.5 倍;材料在蓝光激光功率密度达到 9 W/mm<sup>2</sup> 时,产生发光饱和,对应光通量为 492 lm;并初步探讨了发光饱和机理;耦合红色激光后,色域达到 95.6% NTSC。

**关键词** 光学材料; 荧光微晶玻璃; 激光显示; 氮氧化物; 发光性能

中图分类号 O482.31

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1516007

Narrow-Band Green-Emissive  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> Phosphor-in-Glass Film for Laser Display ApplicationsWang Pengfei<sup>1,2,4†</sup>, Lin Hang<sup>1,2,3†\*</sup>, Lin Shisheng<sup>2</sup>, Wang Yuansheng<sup>2</sup><sup>1</sup>Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, Fujian, China;<sup>2</sup>CAS Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, Fujian, China;<sup>3</sup>Engineering Research Center of Advanced Glass Manufacturing Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China;<sup>4</sup>College of Chemistry and Materials Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China

**Abstract** The green color-converted materials are the core components of laser projection display. To date, the high-performance narrowband green color-converted materials for high-quality laser display are still in short supply. In this paper, the commercial narrowband green-emissive  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> phosphor together with a kind of low-melting-glass of new composition are co-sintered on a high thermal conductivity sapphire substrate coated by one-dimensional photonic crystal film, forming an integrated phosphor-in-glass film composite. It is demonstrated that the thermal erosion of  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> is insignificant after low temperature co-sintering. The composite material exhibits the internal quantum efficiency of 55%, full width at half maximum of 54 nm, and excellent resistance to thermal quenching (the integral luminescence intensity at 150 °C remains about 90% of that at room temperature). It is also found that the one-dimensional photonic crystal film greatly enhances the forward green luminescence up to about 1.5 times. The luminescence saturation takes place under 9 W/mm<sup>2</sup> blue laser irradiation with the corresponding luminous flux of 492 lm, and the latent luminescence saturation mechanism is tentatively analyzed. After coupling with red laser diodes, the color gamut reaches 95.6% NTSC.

**Key words** optical materials; phosphor-in-glass; laser display; oxy-nitride; luminescent properties

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-04-29; 录用日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(U2005213, 51972303, 11974350)、中央高校基本科研业务费专项资金(2232021G-07)、福建省引  
导性项目(2020H0035)、中国福建光电信息科学与技术创新实验室基金(2021ZR134)

通信作者: \*lingh@fjirsm.ac.cn

† 共同第一作者

# 1 引言

自 19 世纪末兴起的黑白显示到 1928 年彩色电视问世,显示技术实现了从黑白向彩色显示技术的时代跨越。而后,随着人们对显示分辨率和色彩丰富程度的极致追求,彩色显示光源不断升级换代,历经金属卤素灯、超高压汞灯、氙灯光源等发展阶段,直至近年兴起的半导体固态光源(主要包括发光二极管 LED 和激光二极管 LD)<sup>[1-3]</sup>。由于 LED 芯片存在“效率骤降”(即电光转换效率随激发功率增加而迅速下降)<sup>[4]</sup>,不能通过提高激发功率的方式增加发光亮度,无法满足大功率场合(如影院)的应用要求;为了提高亮度,不得不采用 LED 阵列方式,但这将大幅增加光源体积、成本,并降低使用寿命,使之相较于传统光源的优势荡然无存<sup>[5]</sup>;而且,LED 还存在发光面积大、光学拓展量高、光效利用率较低等缺点。在这一背景下,LD 激光显示技术应运而生。

当前,LD 激光显示技术的实现方案主要基于“激光+荧光轮(phosphor wheel)”,利用荧光材料在蓝光激光激发下的自发辐射实现多色发光输出(荧光材料制成旋转的荧光轮可显著降低激光的热效应)<sup>[6]</sup>;相较于红绿蓝(RGB)三色激光技术,具有无需消散斑、系统效率高、成本低廉等优点<sup>[7-8]</sup>。其中,“蓝-红色激光+绿光转换材料”方案由于无需使用滤光片、且不使用发光饱和阈值较低的红色荧光材料,可在尽量不牺牲发光亮度的情况下,达到宽色域的要求,实现光色品质兼顾,因而备受关注。商用的激光绿色转换材料多采用  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  ( $\text{LuAG}:\text{Ce}^{3+}$ ) 单晶/陶瓷,性能虽然出色,但  $\text{LuAG}:\text{Ce}^{3+}$  发射带宽大( $>100\text{ nm}$ ),光谱中含有大量青光和黄橙光成分,绿光色彩饱和度低,难以构建宽色域激光显示光源。为此,人们将目光转向具有刚性晶体结构和高度局域配位环境的  $\beta\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$  材料体系,其发射带宽窄( $\sim 55\text{ nm}$ )、量子效率高( $>65\%$ )、抗热猝灭性能优异( $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时光衰 $<10\%$ )。众所周知,有机树脂封装荧光粉由于激光损伤阈值低,无法适用于激光照明/显示,如陶瓷<sup>[9-11]</sup>、单晶<sup>[12-20]</sup>、微晶玻璃<sup>[21-28]</sup>等全无机荧光材料是不可替代的选择。由于  $\beta\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$  晶粒呈各向异性生长,难以制成陶瓷和单晶,研究者致力于将之与玻璃复合形成微晶玻璃。受制于玻璃热导率较低( $<1\text{ W/mK}$ ), $\beta\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$  微晶玻璃块体性能不佳,在  $0.7\text{ W/mm}^2$  的激发功率下就会发生发光饱和。2020 年,厦门大学解荣军团队与中国计量大学王乐团队合作,将  $\beta\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$  微晶玻璃以薄膜形式与蓝宝石基板复合,使之发光饱和和阈值提升至约  $6\text{ W/mm}^2$ ,展示了重要的应用潜力<sup>[29]</sup>。

本文将  $\beta\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$  与一种新型硅硼酸盐低熔点玻璃复合,共烧于镀有一维光子晶体膜的蓝宝石基板上,形成一体化复合材料。研究了荧光复合体表

界面结构、蓝光激光激发下光学性能,并探讨了结构-性能关系。该材料在激光显示领域有较大的发展前景。

# 2 实验

## 2.1 样品制备

采用熔体急冷法制备前驱玻璃粉末。设计的玻璃组成为  $38\text{SiO}_2\text{-}40\text{B}_2\text{O}_3\text{-}4\text{ZnO}\text{-}4\text{Na}_2\text{O}\text{-}3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O}$  (摩尔分数),其中,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$  可形成玻璃网络骨架结构(网络形成体),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{ZnO}$  主要作为玻璃网络中间体,  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$  为玻璃网络修饰体。将粉体原料按照组分配比研磨均匀后置于坩埚中,放入  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  高温炉中保温 2 h,然后将玻璃熔液快速倒入  $300\text{ }^\circ\text{C}$  预热的铜模具中急冷。将玻璃粉碎后,于行星球磨机中以  $480\text{ r/min}$  的转速球磨 12 h,得到前驱玻璃粉末。按松油醇:乙酸乙酯:乙基纤维素的质量比为  $50:46:4$  的比例称量上述有机物,以  $600\text{ r/min}$  转速在室温下搅拌,直至乙基纤维素完全溶解,得到有机胶。在玛瑙研钵中研磨混合  $\beta\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$  荧光粉、前驱玻璃粉以及有机胶(其中,荧光粉与玻璃粉的质量比为  $1:1$ ,有机胶占玻璃荧光粉总质量的  $50\%$ ),获得荧光浆料。随后,使用刮涂法将荧光浆料涂覆在蓝宝石片或镀有一维光子晶体膜的蓝宝石片上(两种基片均购买于北京信田科技有限公司,分别缩写为 SP 和 CSP),并进行低温共烧。升温制度为:至  $150\text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中,放置 48 h,使有机组分充分挥发;而后,在  $730\text{ }^\circ\text{C}$  的高温炉中烧结 20 min 制备得到一体化复合材料(为方便表述,将共烧于蓝宝石基板和镀有光子晶体膜蓝宝石基板上的荧光材料分别简称为  $\beta\text{-SiAlON-PiG-on-SP}$  和  $\beta\text{-SiAlON-PiG-on-CSP}$ )。

## 2.2 样品表征

采用 X 射线粉末衍射仪 (Miniflex600,  $\text{Cu K}_\alpha$ , Rigaku) 分析物相。使用扫描电子显微镜 (SEM, JSM-7600F, JEOL) 进行显微形貌观察分析。利用配备氙灯和  $375\text{ nm}$  脉冲激光器光源的荧光光谱仪 (FLS920, Edinburgh Instruments) 测试发射光谱、激发光谱、温度依赖的发射光谱、以及荧光衰减曲线。利用配备积分球的 FS920 光谱仪测量荧光量子效率 (QE)。对于变温光谱测试,温度控制由冷热台 ( $77\text{-}873\text{ K}$ , THMS600E, Linkam Scientific Instruments) 提供。内量子效率 ( $\eta_{\text{int}}$ ) 测试使用硫酸钡涂覆的积分球结合荧光光谱仪进行。采用自行搭建的激光测试平台进行  $455\text{ nm}$  蓝光激光器辐照下样品的光学性能测试;该系统主要组成部分为高功率蓝光激光器 (LSR455CP-20W, Lasever)、入射功率调节器、直径  $10\text{ cm}$  积分球、光纤探测器 (QEpro, Ocean Optics) 和光学透镜系统(输入激光光斑面积约为  $1\text{ mm}^2$ ),结构示意图可参见之前的报道<sup>[30]</sup>。样品表面温度由红外热像仪 (TIS75, Fluke) 测量。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 显微结构

玻璃基体、 $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉和  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 的 X 射线衍射 (XRD) 测试结果如图 1 所示。前驱玻璃的 XRD 图中,可观察到玻璃的非晶态无定形峰。 $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光玻璃薄膜-蓝宝石复合材料的 XRD 图中,呈现出明锐的晶体衍射峰,与  $\beta$ -SiAlON 标准卡片 (JCPDS NO. 48-1615) 一致;因复合材料中引入的  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉含量较高(质量分数为 50%),无定形峰不明显,但依然存在。据此推断, $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉和选用的玻璃基体成功复合,并未因共烧对  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉产生明显的侵蚀而出现杂相。

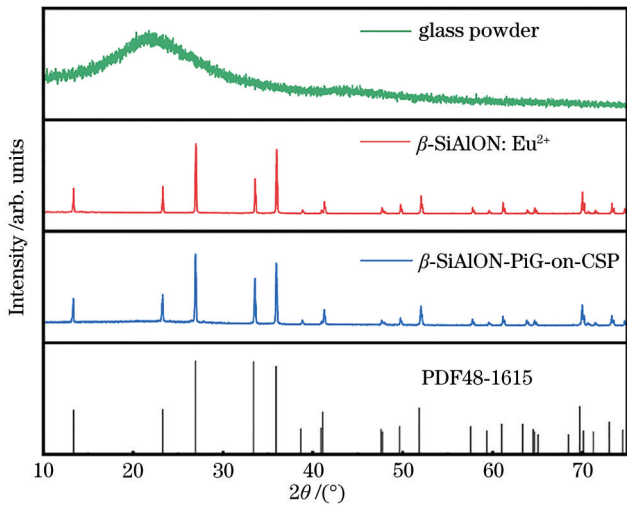


图 1 玻璃基体、 $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉和  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of glass substrate,  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> phosphor and  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP

为进一步观察  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 的微观结构,对样品的断面进行了扫描电子显微镜 (SEM) 观察 (图 2)。可以发现,微晶玻璃薄膜与镀有一维光子晶

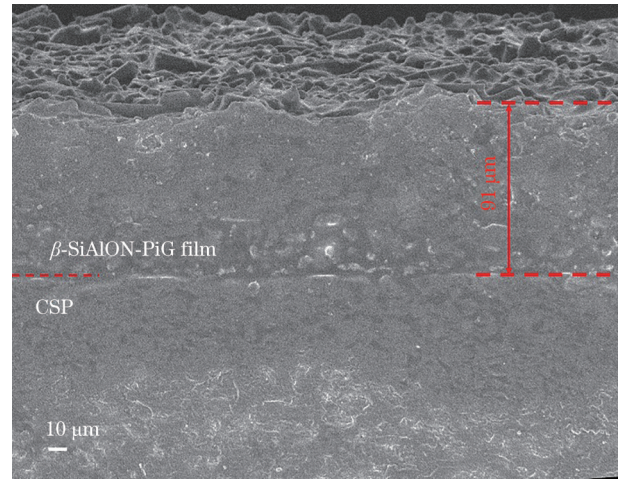


图 2  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 的 SEM 照片

Fig. 2 SEM observation on  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP

体膜的蓝宝石基板紧密结合,膜厚为 91  $\mu$ m。在后续荧光性能测试中,样品膜厚均保持一致。

#### 3.2 荧光性能

$\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉和  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 的稳态荧光光谱测试结果示于图 3(a)。在 450 nm 蓝光激发下,两者的发射光谱基本一致,均呈现窄带发射,峰值位于 538 nm,半峰全宽 (FWHM) 约为 54 nm,发射峰可归属于 Eu<sup>2+</sup> 离子从激发态最低的  $^4f_6(^7F_1)^5d_1$  能级跃迁到基态  $^4f_7(^8S_{7/2})$  能级<sup>[31-32]</sup>。而监测 538 nm 的激发谱显示出了 250~500 nm 的宽谱激发带,与蓝色激光的激发波长相匹配。通过比较, $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 基本延续了  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉的光谱特征。图 3(b) 为  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉和  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 的荧光衰减曲线,两者均可采用双指数拟合,得到的荧光寿命分别为 938 ns 和 855 ns;经测试, $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉的内量子效率为 67%,而  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 的内量子效率为 55%。光谱测试结果表明, $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉受到玻璃热侵蚀的影响程度较低。

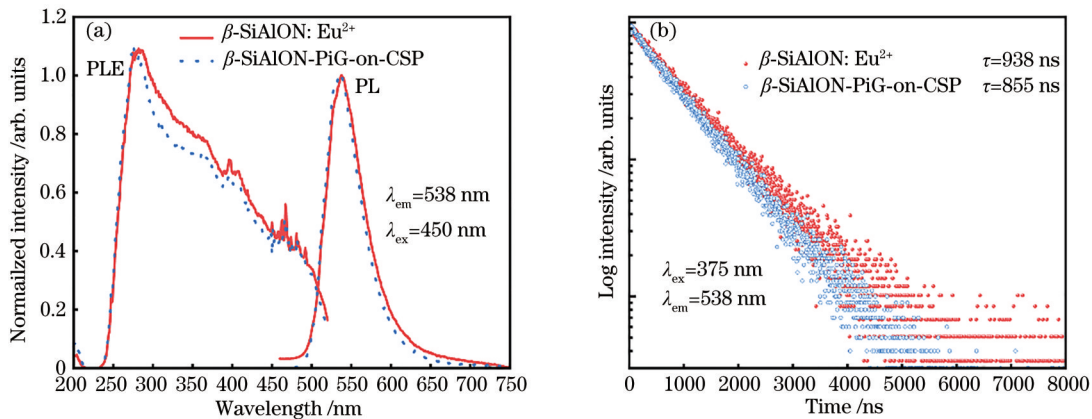


图 3  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光粉和  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 的 (a) 归一化激发/发射谱和 (b) 荧光衰减曲线

Fig. 3 (a) Photoluminescence (PL) and PL excitation (PLE) spectra and (b) luminescent decay curves of  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> phosphor and  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP

### 3.3 蓝光激光激发下的发光行为

利用自行搭建的激光性能测试系统,基于透射式光路设计,评估了制备的 $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP样品在蓝光激光激发下的发光性能。图4(a)中,对比了有/无光子晶体膜样品在 $1\text{ W/mm}^2$ 蓝光激光激发下的发射光谱。结果表明, $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP样品的发射强度为 $\beta$ -SiAlON-PiG-on-SP样品的近1.5倍。这是因为在蓝宝石基板面向激光入射的一侧蒸镀了抗反射膜(AR),显著减少入射蓝光的反射;而在另一侧蒸镀了蓝光带通膜(BP),允许蓝光前向透过的同时,引导背散射荧光前向反射。如图4(b)所示,光子晶体膜不仅使得更多蓝光通过并激发样品,也将背向散射的绿光几乎全部转变为前向散射,从而大幅提高了绿光的光提取效率。

图4(c)为 $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP样品在不同功率入射激光激发下的发射光谱变化,相应的转换绿光功率及红外热像仪采集得到样品表面温度随入射蓝光激光功率密度变化的关系见图4(d)。当蓝光功率从 $1\text{ W/mm}^2$ 增加至 $9\text{ W/mm}^2$ 时,光谱中蓝光激光强度是不断增加的,而对于转换绿光功率的变化则有所不同:1~4  $\text{W/mm}^2$ 范围内,绿光的光功率呈近线性增长;4~9  $\text{W/mm}^2$ 范围内,增幅放缓;9  $\text{W/mm}^2$ 时,材料达到发光饱和,相应光通量为492 lm;大于9  $\text{W/mm}^2$ 时,微晶玻璃荧光薄膜被打穿,转换绿光功率发生骤降。 $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP样品的表面温度在1~6  $\text{W/mm}^2$ 范围内呈现缓慢线性增加;而大于6  $\text{W/mm}^2$ 时,温升趋势更为陡峭;发光饱和时对应表面温度为 $157.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

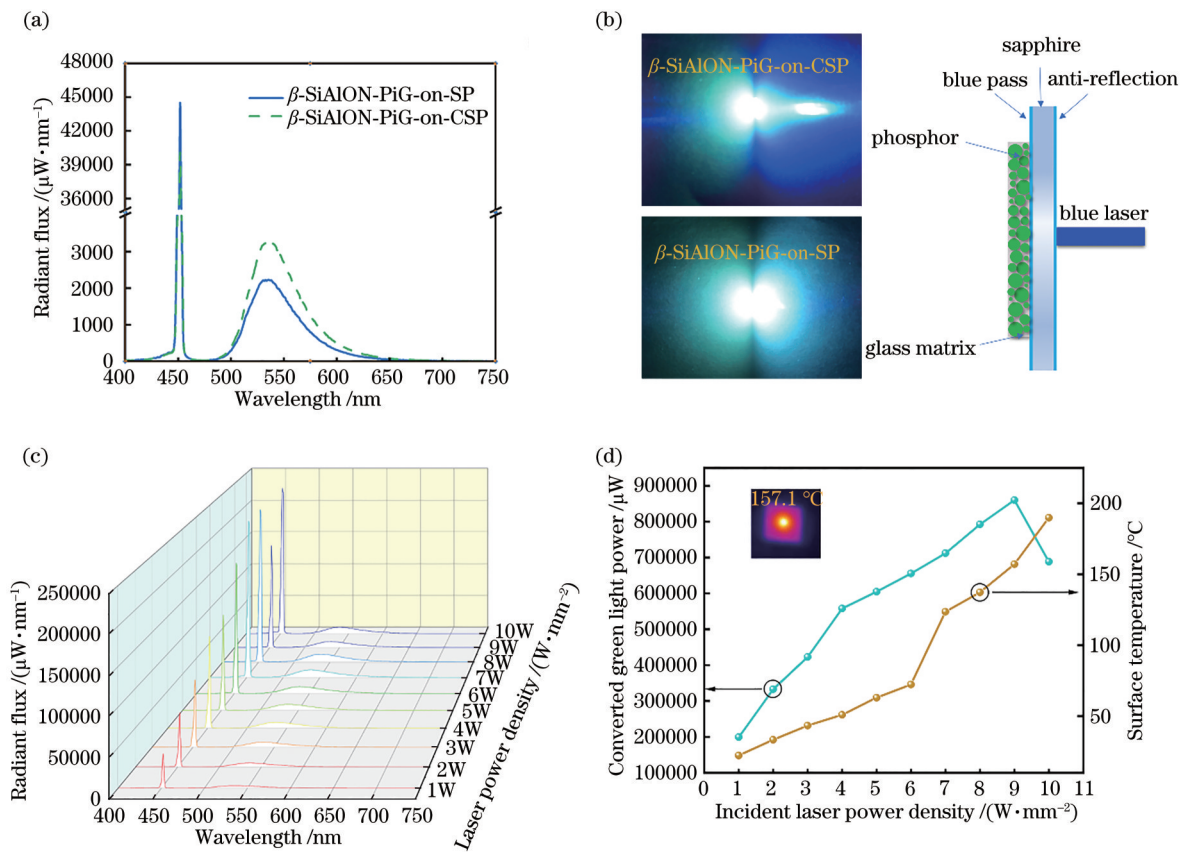


图4 蓝光激光激发下的发光行为。(a)  $1\text{ W/mm}^2$ 蓝光激光激发下 $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP和 $\beta$ -SiAlON-PiG-on-SP的发射光谱比较;(b)  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP的结构示意图和有/无光子晶体膜实际照明效果对比(激光入射方向从右至左);(c)  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP在不同功率入射激光激发下的发射光谱变化;(d)相应的转换绿光功率及样品表面温度随输入蓝光激光功率密度变化的关系图。插图为输入蓝光激光功率密度为 $9\text{ W/mm}^2$ 时的红外热像图

Fig. 4 Luminescence behaviors under blue laser excitation. (a) Comparison of luminescence spectra of  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP and  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-SP under  $1\text{ W/mm}^2$  laser excitation; (b) schematic illustration of  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP configuration structure, and comparison for actual lighting effects between samples with/without photonic crystal film (direction of incident blue laser comes from right to left); (c) variations in luminescence spectra of  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP sample versus incident laser power; (d) corresponding dependences of converted green light power and surface temperature on incident laser power density; inset shows infrared thermal image of  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP under  $9\text{ W/mm}^2$  laser excitation

### 3.4 发光饱和机理探讨

发光饱和现象制约了激光激发荧光转换材料的发

光亮度,针对其开展研究十分必要。究其原因,一般认为可归结于热猝灭和强度猝灭<sup>[33-34]</sup>。热猝灭引发热失

控效应,即“热量→非辐射跃迁加速→量子效率降低→更多热量”的恶性循环过程。强度猝灭原因较为复杂,可能是由于高光子通量激光辐照引起基态耗尽(GSD)<sup>[4]</sup>、激发态吸收(ESA)或能量传递上转换(ETU)所造成的<sup>[35]</sup>。热猝灭和强度猝灭两种效应往往相互纠缠,难以进行区分<sup>[36]</sup>。为此计算了样品的能量转换效率( $\eta_{CE}$ ),其定义为转换后的绿光功率( $P_{em}$ )与吸收的蓝光激光功率( $P_{ab}$ )之比,可以通过以下表达式计算:

$$\eta_{CE} = \frac{P_{em}}{P_{ab}} = \frac{P_{em}}{P_{in} - P_{re}}, \quad (1)$$

式中: $P_{in}$ 是激光功率计记录的入射蓝色激光功率; $P_{re}$ 是通过积分球测得的剩余蓝光激光功率。由于已经使用标准的钨卤素灯校准了积分球的光学响应,因此蓝光和绿光发射带的积分强度代表实际光功率,分别对应于 $P_{re}$ 和 $P_{em}$ 。经计算,相对于最低激发功率密度

时的光转换效率,9 W/mm<sup>2</sup>(发光饱和阈值)时的光转换效率下降了约 58%<sup>[图 5(a)]</sup>。注意到,此时材料表面温度为 157.1 °C,对应于热猝灭荧光衰减约 10%<sup>[图 5(b)]</sup>。二者数值相差较大,显然这不能用热猝灭来解释;该结果表明,当发光饱和时,强度猝灭引起的光致饱和很可能占据主导地位。鉴于在激发功率密度变化范围内材料的吸收效率变化很小(<10%),说明基态始终有足够的电子可供激发,因此,不太可能发生基态耗尽诱导的强度猝灭。根据上面分析,可推测 $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 的发光饱和是由于非线性上转换过程引起的强度猝灭导致的;无论是发生通过相邻两个激活剂离子之间的能量传递,还是通过单个激活剂离子对光子的连续吸收,电子都会从 Eu<sup>2+</sup> 的基态泵浦到 $\beta$ -SiAlON 的导带,最终通过缺陷态,借助无辐射弛豫,与发光中心重新结合,返回基态,导致发光饱和的发生<sup>[图 5(c)]</sup><sup>[37]</sup>。

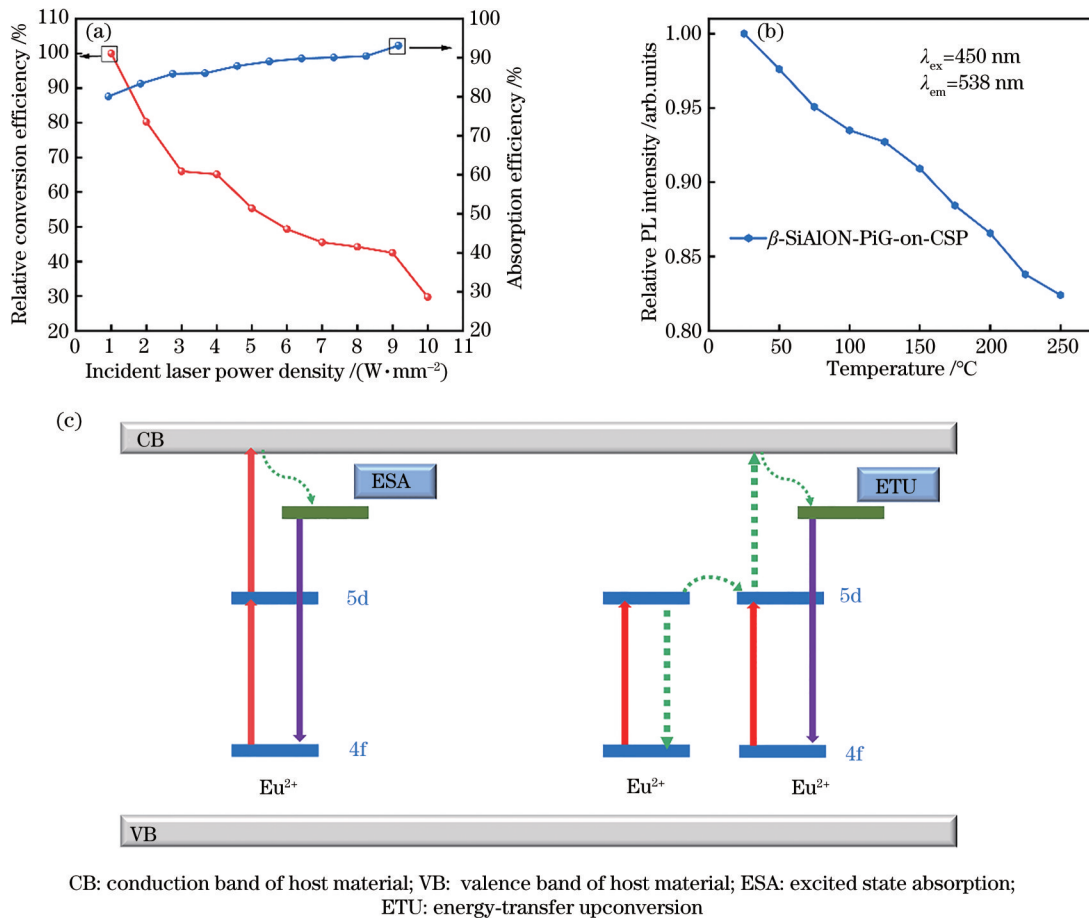


图 5 发光饱和和机理探讨。(a)不同功率蓝光激光激发下样品相对光转换效率和吸光率变化;(b) $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP 发射光谱的积分强度与温度的关系;(c)光致饱和现象的 ESA 和 ETU 机理示意图

Fig. 5 Exploring mechanism of luminescence saturation. (a) Dependences of relative conversion efficiency and absorption efficiency on incident laser power density; (b) integrated PL intensity of  $\beta$ -SiAlON-PiG-on-CSP versus temperature; (c) schematical illustration of optical saturation mechanism of ESA and ETU

### 3.5 耦合红色激光

进一步地,在测试系统中,引入 200 mW、662 nm 的红色激光,以补充红色光谱成分,并初步评估了系统

的光色度性能。如图 6 所示,耦合红色 LD 后,获得了光通量为 508 lm,色域为 95.6% NTSC(计算色域时,未使用商用滤波片透过谱进行折算)的显示原型光源,

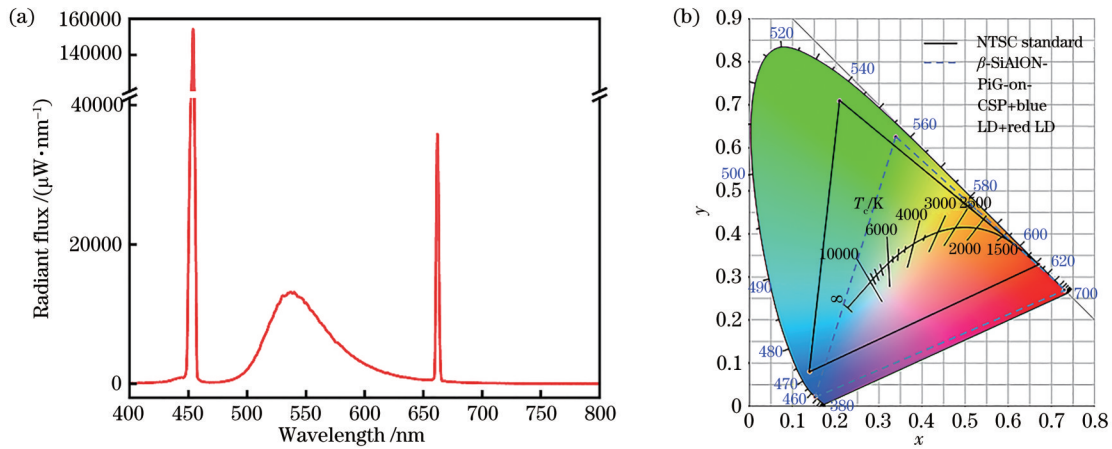


图 6 耦合红色激光后的性能。(a)在 9 W/mm<sup>2</sup>蓝色激光照射下的电致发光光谱;(b)对应的 CIE 色坐标图,包含 NTSC 标准色域和原型光源色域

Fig. 6 Performance after coupling red laser. (a) Electroluminescence spectra under 9 W/mm<sup>2</sup> blue laser irradiation; (b) corresponding CIE color coordinate diagram, including NTSC standard color gamut and prototype light source color gamut

表明该复合材料是一种高效的激光驱动投影色转换器。

## 4 结 论

研制了一种高效窄带绿光发射  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光微晶玻璃薄膜-蓝宝石基板一体化复合材料,可望应用于高亮度、宽色域激光显示领域。研究表明,硅硼酸盐玻璃基质对  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> 荧光微晶的热侵蚀作用有限,复合材料基本保持原有微晶荧光特性。光子晶体膜一方面增加了蓝光透过并激发荧光粉,另一方面显著抑制了荧光背向散射,从而大幅提高复合材料的绿光前向发光亮度。当蓝光激光功率密度达到 9 W/mm<sup>2</sup> 时,复合材料产生发光饱和,光通量为 492 lm;初步分析表明,由非线性上转换过程主导的强度猝灭很可能是发光饱和的主要原因。耦合红色激光后,色域可达 95.6% NTSC。

## 参 考 文 献

- [1] 郭林辉, 张兰平, 傅芸, 等. 基于二向色镜密集光谱合束的高亮度半导体激光研究[J]. 中国激光, 2022, 49(9): 0901001.  
Guo L H, Zhang L P, Fu Y, et al. Dichroic mirror based on dense wavelength combining of high-brightness laser diode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9): 0901001.
- [2] 柯旭, 邓乐武. 弱耦合互注入锁定半导体激光器的线宽研究[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0301001.  
Ke X, Deng L W. Linewidth of mutually injection-locked semiconductor lasers in weak coupling regime[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0301001.
- [3] 王飞, 丁曼曼, 沈德元, 等. 半导体激光泵浦的 3 μm 掺铒固体激光研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101008.  
Wang F, Ding M M, Shen D Y, et al. Research progress of LD-pumped 3 μm Er-doped solid-state lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101008.
- [4] Wierer J J, Tsao J Y, Sizov D S. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(6): 963-993.
- [5] Mysliwiec J, Czajkowski M, Bartkiewicz S, et al. Influence of temperature on dynamics of birefringence switching in photochromic nematic phase[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(11): 113104.
- [6] Yue X M, Xu J, Lin H, et al.  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> phosphor-in-glass film: an efficient laser-driven color converter for high-brightness wide-color-gamut projection displays[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(11): 2100317.
- [7] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review[J]. Applied Optics, 2010, 49(25): F79-F98.
- [8] Lee Y M, Lee D U, Park J M, et al. P-45: a study on the relationships between human perception and the physical phenomenon of speckle[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2008, 39(1): 1347-1350.
- [9] Raukas M, Kelso J, Zheng Y, et al. Ceramic phosphors for light conversion in LEDs[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2012, 2(2): R3168-R3176.
- [10] Tang Y R, Zhou S M, Chen C, et al. Composite phase ceramic phosphor of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ce: YAG for high efficiency light emitting[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 17923-17928.
- [11] Yao Q, Hu P, Sun P, et al. YAG:Ce<sup>3+</sup> transparent ceramic phosphors brighten the next-generation laser-driven lighting[J]. Advanced Materials, 2020, 32(19): 1907888.
- [12] Kang T W, Park K W, Ryu J H, et al. Strong thermal stability of Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> single crystal phosphor for laser lighting[J]. Journal of Luminescence, 2017, 191: 35-39.
- [13] Cantore M, Pfaff N, Farrell R M, et al. High luminous flux from single crystal phosphor-converted laser-based white lighting system[J]. Optics Express, 2016, 24(2):

- A215-A221.
- [14] Park K W, Lim S G, Deressa G, et al. High power and temperature luminescence of  $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}$  bulky and pulverized single crystal phosphors by a floating-zone method[J]. *Journal of Luminescence*, 2015, 168: 334-338.
- [15] Zhou Y Y, Yu C K, Song E H, et al. Three birds with one stone:  $K_2SiF_6: Mn^{4+}$  single crystal phosphors for high-power and laser-driven lighting[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(23): 2000976.
- [16] Salimian A, Silver J, Fern G R, et al. Investigating the emission characteristics of single crystal YAG when activated by high power laser beams[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2016, 5(10): R172-R177.
- [17] Sai Q L, Xia C T. Tunable colorimetric performance of  $Al_2O_3$ -YAG:  $Ce^{3+}$  eutectic crystal by  $Ce^{3+}$  concentration [J]. *Journal of Luminescence*, 2017, 186: 68-71.
- [18] Rejman M, Babin V, Kucerková R, et al. Temperature dependence of CIE-x, y color coordinates in YAG: Ce single crystal phosphor[J]. *Journal of Luminescence*, 2017, 187: 20-25.
- [19] Latynina A, Watanabe M, Inomata D, et al. Properties of Czochralski grown Ce, Gd:  $Y_3Al_5O_{12}$  single crystal for white light-emitting diode[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 553: 89-92.
- [20] Gu G R, Xiang W D, Yang C, et al. Synthesis and luminescence properties of a  $H_2$  annealed Mn-doped  $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}$  single crystal for WLEDs[J]. *CrystEngComm*, 2015, 17(24): 4554-4561.
- [21] 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]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 702: 193-198.
- [22] Zhong J S, Peng Y Z, Chen D Q, et al. Highly efficient rare-earth-free deep red emitting phosphor  $La_2Li_{1-y}Sb_{1-x}O_6: xMn^{4+}, yMg^{2+}$ : application in high-power warm w-LEDs [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(48): 13305-13315.
- [23] Zhong J S, Chen X, Chen D Q, et al. A novel rare-earth free red-emitting  $Li_3Mg_2SbO_6: Mn^{4+}$  phosphor-in-glass for warm w-LEDs: Synthesis, structure, and luminescence properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 773: 413-422.
- [24] Zhang Y, Zhang X J, Zhang H R, et al. Improving moisture stability of  $SrLiAl_3N_4: Eu^{2+}$  through phosphor-in-glass approach to realize its application in plant growing LED device[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 545: 195-199.
- [25] Zhang R, Wang B Y, Zhu W F, et al. Preparation and luminescent performances of transparent screen-printed  $Ce^{3+}: Y_3Al_5O_{12}$  phosphors-in-glass thick films for remote white LEDs[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 720: 340-344.
- [26] Zhang R, Lin H, Yu Y L, et al. A new-generation color converter for high-power white LED: transparent  $Ce^{3+}: YAG$  phosphor-in-glass[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(1): 158-164.
- [27] 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  $LuAG: Ce^{3+}$  PiG substrate[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 306: 858-865.
- [28] Li M C, Zhang X J, Zhang H R, et al. Highly efficient and dual broad emitting light convertor: an option for next-generation plant growth LEDs[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(12): 3617-3622.
- [29] 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]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(5): 1746-1754.
- [30] 王鹏飞, 隋萍, 林世盛, 等.  $Lu_2SrAl_4SiO_{12}: Ce^{3+}$  荧光玻璃陶瓷膜-蓝宝石复合材料及其激光照明应用[J]. *发光学报*, 2021, 42(10): 1493-1501.
- Wang P F, Sui P, Lin S S, et al.  $Lu_2SrAl_4SiO_{12}: Ce^{3+}$  phosphor in glass film-on-sapphire and its application to laser lighting[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(10): 1493-1501.
- [31] Hirosaki N, Xie R J, Kimoto K, et al. Characterization and properties of green-emitting  $\beta$ -SiAlON:  $Eu^{2+}$  powder phosphors for white light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(21): 211905.
- [32] Xie R J, Hirosaki N, Li H L, et al. Synthesis and photoluminescence properties of  $\beta$ -sialon:  $Eu^{2+}$  ( $Si_{6-x}Al_xO_2N_8$ :  $Eu^{2+}$ ): a promising green oxynitride phosphor for white light-emitting diodes[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2007, 154(10): J134.
- [33] Lenef A, Raukas M, Wang J, et al. Phosphor performance under high intensity excitation by InGaN laser diodes[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2020, 9(1): 016019.
- [34] Zheng P, Li S X, Takeda T, et al. Unraveling the luminescence quenching of phosphors under high-power-density excitation[J]. *Acta Materialia*, 2021, 209: 116813.
- [35] Sijbom H F, Joos J J, Martin L I D J, et al. Luminescent behavior of the  $K_2SiF_6: Mn^{4+}$  red phosphor at high fluxes and at the microscopic level[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2015, 5(1): R3040-R3048.
- [36] Lawson J K, Payne S A. Excited-state absorption of  $Eu^{2+}$ -doped materials[J]. *Physical Review B, Condensed Matter*, 1993, 47(21): 14003-14010.
- [37] Lenef A, Kelso J, Zheng Y, et al. Radiance limits of ceramic phosphors under high excitation fluxes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8841: 884107.