

文章编号: 1000-7032(2019)07-0842-07

## 基于 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光粉复合 Eu<sup>3+</sup> 掺杂荧光玻璃的激光照明器件

郑 飞<sup>1</sup>, 茅云蔚<sup>1</sup>, 杨波波<sup>1\*</sup>, 邹 军<sup>1\*</sup>, 刘祎明<sup>2</sup>,  
谢 宇<sup>1</sup>, 汤子睿<sup>1</sup>, 库黎明<sup>3</sup>, 邵鹏睿<sup>4</sup>, 陈狄杰<sup>5</sup>

(1. 上海应用技术大学 理学院, 上海 201418; 2. 上海应用技术大学 材料科学与工程学院, 上海 201418;  
3. 有研半导体材料有限公司, 北京 100088; 4. 深圳市晶台股份有限公司, 广东 深圳 518105;  
5. 浙江美科电器有限公司, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:** 采用结晶法和低温共烧结法制备了 Eu<sup>3+</sup> 掺杂的 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>: Ce<sup>3+</sup> 荧光玻璃, 对制备出的样品进行能量色散 X 射线谱和光致发光光谱测试, 表明稀土离子 Eu<sup>3+</sup> 与 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光粉已掺入荧光玻璃。掺杂不同含量 Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光玻璃封装成的激光照明器件在驱动电流 100 mA 下, 经过 STC-4000 快速光谱仪和 PMS-80 可见光谱分析系统测试, 掺杂质量分数 1% YAG: Ce<sup>3+</sup> 复合质量分数 9% 的 Eu<sup>3+</sup> 的荧光玻璃封装的激光照明器件发光效率为 267.1 lm/W。激光照明器件随着电流的增加, 其显色指数逐渐增大, 但增加幅度较小。

**关键词:** 结晶法; 低温共烧结法; 荧光玻璃; 激光照明器件

中图分类号: TN365 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20194007.0842

## Laser Lighting Device Based on YAG: Ce<sup>3+</sup> Phosphor Composite Eu<sup>3+</sup> Doped Phosphor-in-glasses

ZHENG Fei<sup>1</sup>, MAO Yun-wei<sup>1</sup>, YANG Bo-bo<sup>1\*</sup>, ZOU Jun<sup>1\*</sup>, LIU Yi-ming<sup>2</sup>,  
XIE Yu<sup>1</sup>, TANG Zi-rui<sup>1</sup>, KU Li-ming<sup>3</sup>, SHAO Peng-rui<sup>4</sup>, CHEN Di-jie<sup>5</sup>

(1. School of Science, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;  
3. GRINM Semiconductor Materials Co., Ltd., Beijing 100088, China;  
4. Shenzhen Kinglight Co., LTD, Shenzhen 518105, China; 5. Zhejiang Meike Electrical Appliances Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)  
\* Corresponding Authors, E-mail: boboyang@sit.edu.cn; zoujun@sit.edu.cn

**Abstract:** The Eu<sup>3+</sup> doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>: Ce<sup>3+</sup> phosphor-in-glasses (PIGs) was prepared by crystallization and low temperature co-sintering. The prepared samples were tested by energy dispersive X-ray and photoluminescence spectroscopy, indicating that the rare earth ions Eu<sup>3+</sup> and YAG: Ce<sup>3+</sup> phosphors have been incorporated into the PIG. YAG: Ce<sup>3+</sup> PIG with different content of Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is packaged in a laser illumination device with a driving current of 100 mA. It is tested by STC-4000 fast spectrometer and PMS-80 visible spectrum analysis system, doping mass fraction 1% YAG: Ce<sup>3+</sup> composite mass fraction 9% Eu<sup>3+</sup> phosphor-in-glasses encapsulated laser lighting device luminous efficacy is 267.1 lm/W. As the current of laser illumination devices increases, the color rendering index increases gradually, but the increase is small.

收稿日期: 2018-07-17; 修订日期: 2018-09-22

基金项目: 浙江省科技计划项目重点研发计划(2018C01046); 横向项目(激光植物灯)(J2017-243)资助

Supported by Science and Technology Planning Project of Zhejiang Province(2018C01046); Enterprise-funded Latitudinal Research Project(J2017-243)

**Key words:** crystallization; low temperature co-sintering; phosphor-in-glasses; laser lighting device

## 1 引言

固态照明光源如今开始慢慢从科研领域走入大众的视野,其环保、小体积、长使用寿命、高潜在光效等优点使它成为了当今极具发展潜力、值得研究的绿色光源,越来越多的国家开始将发展固态照明产业作为未来科技发展中的一个重要环节<sup>[1-4]</sup>。随着制造技术的成熟,固态照明产业必然会在不久的将来大举进军通用照明市场。目前,主要应用在市面上的固态照明光源是白光发光二极管(Light emitting diode, LED),其中主流的方案是通过蓝光LED芯片激发不同配比的荧光粉或不同颜色荧光体来实现白光输出的方法<sup>[5]</sup>。但是,经过实验研究发现,蓝光LED存在“效率骤降”的现象,当驱动蓝光LED芯片的功率密度慢慢增加到一定程度时,蓝光LED芯片的出光效率反而会越来越快地衰减<sup>[6]</sup>。“效率骤降”现象之于蓝光LED如同跗骨之疽,在过去多年的研究发展中都是重点、热点,但是始终没有找到让学者们和市场满意的合理的解决方法。目前,最受到科学家们青睐的替代光源是激光二极管(Laser diode, LD),激光的光束近似垂直于光表面,光电转换效率高,光功率输出大<sup>[7-8]</sup>。与自然光相比,激光的优点是频率、相位和偏振方向相同<sup>[9]</sup>。由于其优异的物理性能,激光广泛应用于军事<sup>[10]</sup>、3D打印<sup>[11]</sup>、激光切割<sup>[12]</sup>、健康与美容<sup>[13]</sup>、投影显示<sup>[14]</sup>等方面。

不同于蓝光LED,因为蓝光LD的发光原理是原子受激辐射,所以在照明的通用需求范围内,蓝光LD不会出现“效率骤降”现象,凭着这一强劲优势,蓝光LD十分有可能代替蓝光LED成为新一代固态照明光源。2005年,日本Nichia率先提出基于半导体激光器的白光输出,将半导体激光器利用光纤耦合后激发荧光粉产生白光<sup>[15]</sup>。2007年,Nichia在500 mW激光器基础上得到了光通量96 lm、光效40 lm/W、亮度85 cd/mm<sup>2</sup>的固态白光<sup>[16]</sup>。2013年,美国加州大学的Kristin等把蓝色激光二极管与黄光结合后激发Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup>(YAG:Ce<sup>3+</sup>)荧光粉产生白色光源,其相关色温为4 400 K,显色指数达到57,光通量为252 lm,发光效率为76 lm/W<sup>[17]</sup>。2014年,Wierer等

得到色温4 600 K、显色指数70的白色光源,他们是采用450 nm蓝光直接激发荧光粉<sup>[18]</sup>。但是,高功率的激光光源直接照射到荧光粉表面上时会迅速产生大量的热,导致荧光粉迅速衰减,故与高功率激光匹配使用的荧光粉必须具有较高的耐热性<sup>[19]</sup>。因此我们采用荧光玻璃远程封装低功率激光二极管,荧光玻璃是一种由玻璃基质与荧光粉烧结而成的复合材料,不仅能避免荧光粉的热猝灭,还具有良好的透明性、玻璃材料的耐热性、抗蚀性等优点<sup>[20]</sup>。荧光玻璃的玻璃化转变温度高,拥有良好的热稳定性,可长时间工作在高温环境中,并且还具有热导率高、热膨胀系数低等优点。在激光照明安全问题上,日本研究人员Kinoshita等进行了研究,结果表明激光应用于固体照明领域是安全可靠的<sup>[21]</sup>。

本文通过二次烧结法制备出掺杂不同含量Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的YAG:Ce<sup>3+</sup>荧光玻璃,通过扫描电子显微镜(SEM)、能量色散X射线谱(EDS)和光致发光光谱(PL)测试,分析了荧光玻璃的结构组分与其光学性质。然后将制备出来的荧光玻璃封装到激光二极管上,并利用STC-4000快速光谱仪和PMS-80可见光谱分析系统,研究掺杂不同比例稀土离子的YAG:Ce<sup>3+</sup>荧光粉的光效、色温、色坐标的变化情况。

## 2 实验

将玻璃基质氧化物原料Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(99.99%,上海麦克林)、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(98%,上海麦克林)、ZnO(99%,上海麦克林)按照质量分数比为25:70:5配置玻璃基质原料,并称取上述玻璃基质原料总质量的1%~9%的Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。将其与玻璃基质原料充分混合与研磨后倒入刚玉坩埚中,把装有混合粉末的刚玉坩埚放置于温度为900℃的马弗炉中烧结1 h;将熔融的玻璃熔融体倒入温度为室温的铜铸模板上,退火至室温后得到母体玻璃。将母体玻璃放置于玛瑙钵中研磨成母体玻璃粉,并过200目筛。用母体玻璃粉与高温固相法制备的YAG:Ce<sup>3+</sup>荧光粉以质量分数1%混合并研磨均匀;混合后的粉末置于温度为600℃的马弗炉中烧结30 min得到黄色荧光玻璃。将荧光玻璃打磨抛光至厚度为0.4 mm,并用激光切割成直径为1.5 mm的圆

形荧光玻璃,用环氧树脂胶将荧光玻璃与激光二极管进行封装,制备成激光照明器件。采用日本 JEOL 的 JS-6700 型能量色散 X 射线光谱仪确认稀土离子  $\text{Eu}^{3+}$  与  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光粉已掺入荧光玻璃中,EL 谱图采用 STC-4000 快速光谱仪和 PMS-80 可见光谱分析系统进行测试。

### 3 结果与讨论

图 1 为掺杂质量分数 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  复合质量分数 9% 的  $\text{Eu}^{3+}$  的荧光玻璃的 SEM 与 EDS 图,从图中可以看出稀土离子与  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光粉已经掺入到荧光玻璃内。图 2 是掺杂 3%~9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  的 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光玻璃的发射谱。从图中可以看出,掺杂 3%~9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  和 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光玻璃的 4 条曲线中,当  $\text{Eu}^{3+}$  含量分别为

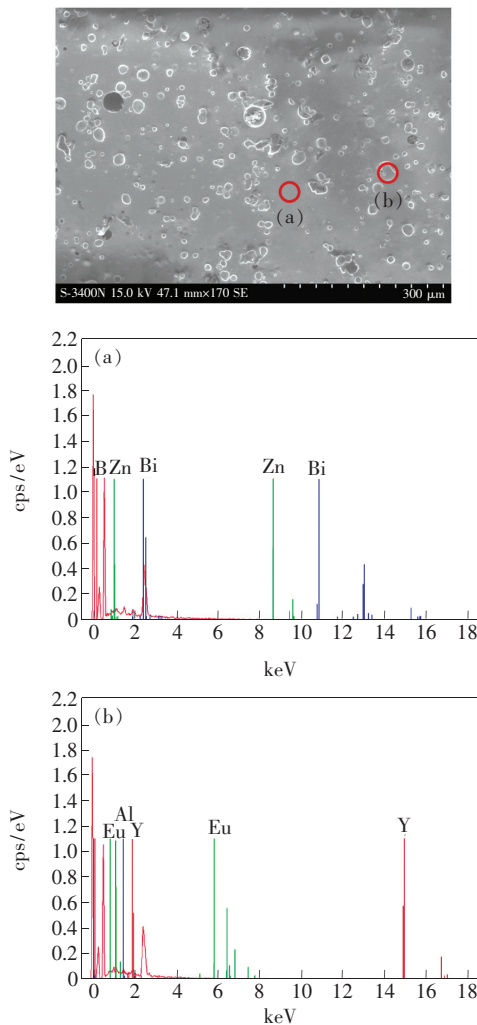


图 1 掺杂 9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  的 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光玻璃的 SEM 和 EDS 图

Fig. 1 SEM and EDS diagram of 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  PIG doped with 9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$

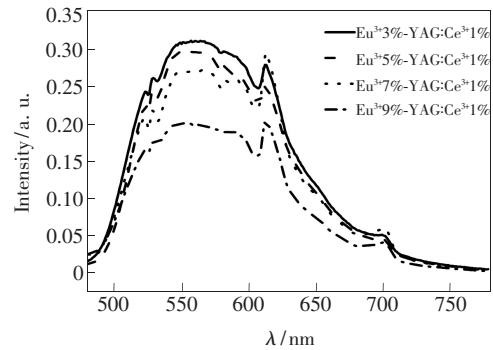


图 2 掺杂 3%~9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  的 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光玻璃的 PL 谱

Fig. 2 PL spectra of 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  PIG doped with 3%~9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$

3%、5%、7% 和 9% 时,PL 谱图的中心波长分别为 556.9、565.5、612.7、612.3 nm。查询相关文献发现  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光粉的 PL 谱的最强发射峰为 530 nm,属于  $\text{Ce}^{3+}$  的  $5d \rightarrow 4f$  的特征跃迁发射<sup>[22]</sup>。而本文中掺杂 3%~9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  和 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光玻璃的发射谱的中心波长因为  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光粉中  $\text{Ce}^{3+}$  和掺杂的  $\text{Eu}^{3+}$  相互影响产生红移,可以进一步表明稀土离子  $\text{Eu}^{3+}$  与  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光粉已掺入荧光玻璃。随着  $\text{Eu}^{3+}$  含量增大,掺杂 3%~9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  的 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光玻璃的 PL 谱的中心波长不断发生红移,并在  $\text{Eu}^{3+}$  含量为 7% 时,达到 612.7 nm,随后随着  $\text{Eu}^{3+}$  含量的增加,中心波长保持在 612 nm。

利用 STC-4000 快速光谱仪和 PMS-80 可见光谱分析系统分析掺杂 3%~9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  的 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光玻璃封装成的激光照明器件在 100 mA 电流驱动下的光学性能。图 3 是掺杂 3%~9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  的 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光玻璃封装成的激光照明器件的 EL 谱,从图中可以看出随着  $\text{Eu}^{3+}$  含量的增加,其峰值的强度随之增大,但  $\text{Eu}^{3+}$  含量为 9% 时发生反常现象,这是因为发射强度随着  $\text{Eu}^{3+}$  含量的增加,先增强后减弱,最强发射时  $\text{Eu}^{3+}$  含量为 7% 左右。表 1 为掺杂 3%~9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  和 1%  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光玻璃封装成的激光照明器件的光学参数,从表中可以发现相同含量  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  荧光粉下, $\text{Eu}^{3+}$  含量为 3%~9% 的的荧光玻璃在电流为 100 mA、电压为 4.66 V 的蓝光 450 nm 激光二极管激发下,它们的色温分别为 3 837, 4 060, 5 390, 5 498 K,成递增趋势。因为  $\text{Eu}^{3+}$  可以提高显色性,其显色指数 CRI 也随着  $\text{Eu}^{3+}$  含量

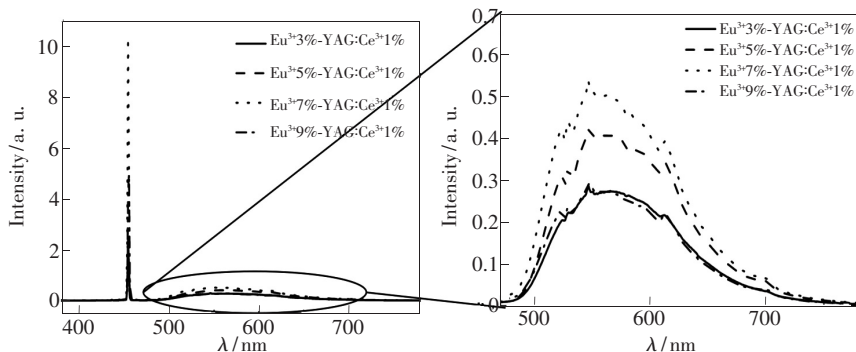


图 3 掺杂不同含量 Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光玻璃封装成的激光照明器件的 EL 谱

Fig. 3 EL spectra of laser illumination device encapsulated with YAG: Ce<sup>3+</sup> PIG doped with different content of Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

表 1 掺杂不同含量 Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光玻璃封装成的激光照明器件的光学参数

Tab.1 Optical parameters of laser illumination devices encapsulated with YAG: Ce<sup>3+</sup> PIG doped with different content of Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

序号	比例	色温/K	色坐标	显色指数	光通量/lm
A	3% Eu-1% YAG: Ce <sup>3+</sup>	3 837	0.410 6, 0.456 0	65.4	85.309
B	5% Eu-1% YAG: Ce <sup>3+</sup>	4 060	0.391 3, 0.427 1	66.5	109.17
C	7% Eu-1% YAG: Ce <sup>3+</sup>	5 390	0.335 2, 0.352 3	73.2	144.74
D	9% Eu-1% YAG: Ce <sup>3+</sup>	5 498	0.332 5, 0.346 0	74.4	124.48

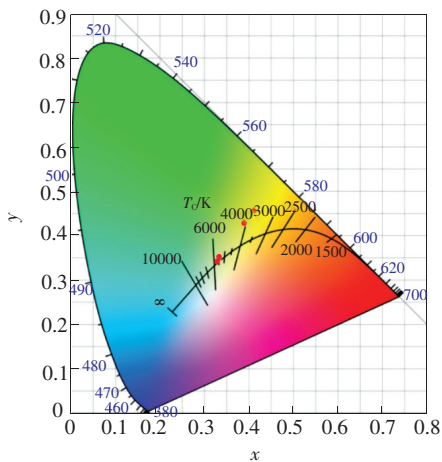


图 4 掺杂不同含量 Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 1% YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光玻璃封装成的激光照明器件的 CIE 图

Fig. 4 CIE diagram of laser illumination device encapsulated with 1% YAG: Ce<sup>3+</sup> PIG doped with different content of Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

的增加而增大。从图 4 中可以看到随着 Eu<sup>3+</sup> 的不断 增加, 激光照明器件的色温逐渐偏向黑体辐射线, 它发出来的光越来越自然。

通过图 4 发现掺杂 9% Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 1% YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光玻璃封装成的激光照明器件的色坐标点最接近黑体辐射线, 因此, 将封装好的激光照明器件通过 STC-4000 快速光谱仪在不同电流驱动下

测试, 可以得到如图 5 所示的 EL 谱。在驱动电流为 40 ~ 110 mA 范围内, 可以从 EL 谱中看到随着电流的增大, 其光谱强度也越来越大, 这是因为随着电流的增加, 激光的光功率越来越大, 蓝光激光激发的荧光粉颗粒的数目增加, 所以其光谱强度越来越大。

表 2 为通过 STC-4000 快速光谱仪测试得出的不同电流驱动的掺杂 9% Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光玻璃封装成的激光照明器件的光学参数。从表中可以看出, 随着电流的增加, 器件的色温在逐渐升高, 但色温变化不明显。图 6 为不同电流驱动的掺杂 9% Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光玻璃封装成的激光照明器件的 CIE 图, 从图中可以看出, 在电流增加的过程中, 色坐标在逐渐蓝移, 并且逐渐靠近黑体辐射线。在蓝移过程中, 色坐标漂移并不明显, 移动范围比较小。而且其显色指数 CRI 也逐渐增大。

图 7 为不同电流驱动的掺杂 9% Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光玻璃封装成的激光照明器件的光效和色温变化趋势。从图中可以看出, 驱动电流从 40 mA 增大到 110 mA, 激光照明器件的色温的整体趋势是随着电流的增加而增大。而光效的变化趋势是先随着电流的增大而增大, 100 mA 时光效最大, 为 267.1 lm/W; 随后降低。这是因为激

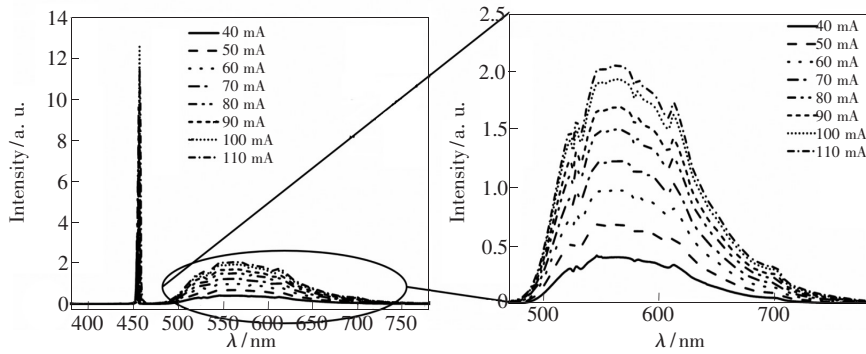


图 5 不同电流驱动的掺杂 9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  的  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  荧光玻璃封装成的激光照明器件的 EL 图

Fig. 5 EL diagram of a laser-illuminated device packaged with different current-driven  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  PIG doped with 9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$

表 2 不同电流驱动的掺杂 9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  的  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  荧光玻璃封装成的激光照明器件的光学参数

Tab. 2 Optical parameters of laser illumination devices packaged with different current-driven  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  PIG doped with 9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$

序号	电流/mA	色温/K	色坐标	显色指数	光通量/lm
A	40	5 345	0.336 4,0.352 8	72.5	16.085
B	50	5 327	0.336 8,0.352 1	72.6	37.122
C	60	5 356	0.336,0.350 7	72.9	58.353
D	70	5 356	0.336,0.351	73.1	76.963
E	80	5 390	0.335 2,0.349 8	73.5	94.074
F	90	5 474	0.333 1,0.346 5	74.2	107.69
G	100	5 498	0.332 5,0.346	74.4	124.48
H	110	5 579	0.330 6,0.343 2	75.2	123.23

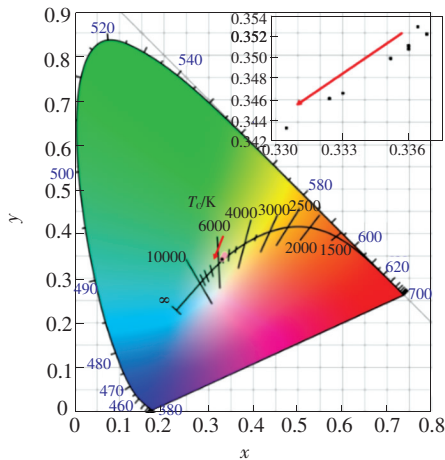


图 6 不同电流驱动的掺杂 9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  的  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  荧光玻璃封装成的激光照明器件的 CIE 图

Fig. 6 CIE diagram of laser illumination device packaged with different current-driven  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  PIG doped with 9%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$

光二极管的最大额定电流为 100 mA,当驱动电流超过 100 mA 时,激光二极管的光功率随之降低。

导致光效降低。

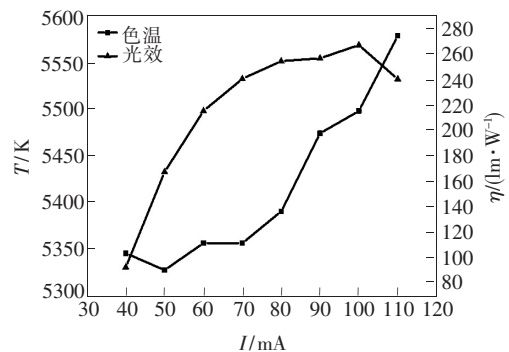


图 7 色温与光效随电流变化曲线

Fig. 7 Curve of correlated color temperature and luminous efficacy with current

### 4 结 论

本文采用结晶法和低温共烧结法制备了  $\text{Eu}^{3+}$  掺杂的  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  荧光玻璃,通过 EDS 测试以及 PL 谱图分析说明荧光玻璃中已掺杂稀土离子  $\text{Eu}^{3+}$  和  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  荧光粉。将所制备

的掺杂3%~9% Eu<sup>3+</sup>的1% YAG:Ce<sup>3+</sup>荧光玻璃封装成的激光照明器件通过STC-4000快速光谱仪和PMS-80可见光谱分析系统分析测试,可以发现掺杂9% Eu<sup>3+</sup>的1% YAG:Ce<sup>3+</sup>的荧光玻璃厚度为0.4 mm时所封装的激光照明器件驱动电流为100 mA驱动下,显色指数为74.4,色温为5 498 K,光通量为124.48 lm,发光效率为267.1 lm/W。随着电流的增加,掺杂9% Eu<sup>3+</sup>的

1% YAG:Ce<sup>3+</sup>的荧光玻璃封装的激光二极管的显色指数逐渐增大,但增加幅度较小;色温的整体变化趋势与电流的变化趋势相同;器件的光效先增大后降低。后期在器件封装上仍需进一步的探索,在固态照明技术应用飞速发展的今天,应该对激光照明器件的封装荧光材料进行深入研究,争取早日研究出满足通用照明市场需求的激光照明器件。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] TSAO J Y. Solid-state lighting: lamps, chips, and materials for tomorrow [J]. *IEEE Circuits Devices Mag.*, 2004, 20(3): 28-37.
- [ 2 ] 史光国. 半导体发光二极管及固体照明 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
SHI G G. *Semiconductor Light-emitting Diodes and Solid-state Lighting* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [ 3 ] STEIGERWALD D A, BHAT J C, COLLINS D, et al. Illumination with solid state lighting technology [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, 8(2): 310-320.
- [ 4 ] 徐时清, 金尚忠, 王宝玲, 等. 固体照明光源-白光LED的研究进展 [J]. *中国计量学院学报*, 2006, 17(3): 188-191.  
XU S Q, JIN S Z, WANG B L, et al. Solid state lighting-recent progress in research of white light emitting diodes [J]. *J. China Jiliang Univ.*, 2006, 17(3): 188-191. (in Chinese)
- [ 5 ] 肖芬. 紫外激发白光LED荧光粉的制备及发光特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
XIAO F. *Preparation and Luminescence Properties of Phosphors for UV Excited White Light-emitting Diodes* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [ 6 ] 陶岳彬. GaN基大功率蓝光LED的MOCVD生长和改善效率骤降特性的研究 [D]. 北京: 北京大学, 2011.  
TAO Y B. *Research on MOCVD Growth and Improvement Efficiency Drop Characteristics of GaN-based High Power Blue LEDs* [D]. Beijing: Peking University, 2011. (in Chinese)
- [ 7 ] KOECHNER W. *Solid-state Laser Engineering* [M]. New York: Springer, 2006.
- [ 8 ] RAZUM N J. Laser physics [J]. *Facial Plast. Surg.*, 1989, 6(3): 137-143.
- [ 9 ] THOMAS G, ISAACS R. Basic principles of lasers [J]. *Anaesth. Intensive Care Med.*, 2011, 12(12): 574-577.
- [ 10 ] HERREROS D N, FANG X. Laser ignition of elastomer-modified cast double-base (EMCDB) propellant using a diode laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2017, 89: 21-26.
- [ 11 ] SELIMIS A, MIRONOV V, FARSARI M. Direct laser writing: principles and materials for Scaffold 3D printing [J]. *Microelectron. Eng.*, 2015, 132: 83-89.
- [ 12 ] RODRIGUES G C, DUFLOU J R. Opportunities in laser cutting with direct diode laser configurations [J]. *CIRP Ann.*, 2017, 66(1): 245-248.
- [ 13 ] ABSTEN G T. Physics of light and lasers [J]. *Obstet. Gynecol. Clin. North Am.*, 1991, 18(3): 407-427.
- [ 14 ] LIU H, SUN C L, WANG W S, et al. Design of a LCOS laser projector [J]. *Optik*, 2015, 126(15-16): 1483-1486.
- [ 15 ] NARUKAWA Y, NAGAHAMA S I, TAMAKI H, et al. Development of high-luminance white light source using GaN-based light emitting devices [J]. *应用物理*, 2005, 74(11): 1423-1432.
- [ 16 ] KOZAKI T, NAGAHAMA S, MUKAI T. Recent progress of high-power GaN-based laser diodes [C]. *Proceedings Volume 6485, Novel In-plane Semiconductor Lasers VI, San Jose, California, USA*, 2007, 6485: 648503.
- [ 17 ] DENAULT K A, CANTORE M, NAKAMURA S, et al. Efficient and stable laser-driven white lighting [J]. *AIP Adv.*, 2013, 3(7): 072107-1-7.
- [ 18 ] WIERERJR J J, TSAO J Y, SIZOV D S. The potential of III-nitride laser diodes for solid-state lighting [J]. *Phys. Status Solidi C*, 2014, 11(3-4): 674-677.
- [ 19 ] 许礼强. 基于激光远程激发荧光粉(LARP)技术的新型白光光源研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2015.

- XU L Q. *Study on New White Light Source base on LARP Technology* [D]. Shenzhen:Shenzhen University, 2015. (in Chinese)
- [20] 王子明,黄笑彤,杨波波,等. 低温共烧结制备  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  荧光玻璃的研究 [J]. 光电技术应用, 2017,32(6):39-43.
- WANG Z M,HUANG X T,YANG B B,*et al.*. Preparation of  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  phosphor in glass by low-temperature co-sintering method [J]. *Electro-Opt. Technol. Appl.*, 2017,32(6):39-43. (in Chinese)
- [21] KINOSHITA J,IKEDA Y,TAKEDA Y,*et al.*. Suppressed speckle contrast of blue light emission out of white lamp with phosphors excited by blue laser diodes for high-brightness lighting applications [J]. *Opt. Rev.*, 2012,19(6):427-431.
- [22] 武传雷. YAG 荧光粉的制备和性能研究 [D]. 上海:上海师范大学, 2013.
- WU C L. *Preparation and Properties of YAG Phosphors* [D]. Shanghai:Shanghai Normal University, 2013. (in Chinese)



郑飞(1993 -),男,安徽池州人,硕士研究生,2016年于皖西学院获得学士学位,主要从事半导体材料与器件的研究。

E-mail: 176181107@mail.sit.edu.cn



邹军(1978 -),男,湖北襄阳人,博士,教授,硕士生导师,2007年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事半导体材料与器件的研究。

E-mail: zoujun@sit.edu.cn



杨波波(1990 -),男,湖南平江人,博士研究生,实验师,2015年于上海应用技术大学获得硕士学位,主要从事光电材料与器件的研究。

E-mail: boboyang@sit.edu.cn