

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

# Eu<sup>3+</sup> 掺杂硼酸银玻璃制备、表征及其 在白光发光二极管中的应用

赵文倩, 张映辉\*, 付少博, 陈宝玖  
(大连海事大学 物理系, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**研究了采用玻璃荧光体实现白光发光二极管(LED)的可能性。采用熔融淬火技术制备了一系列 Eu<sup>3+</sup> 掺杂的含不同比例银成分的硼酸银玻璃,并对玻璃的结构、光谱及色度学性质进行了研究。X 射线衍射测量证明在其能分辨的水平上样品中没有银粒子存在,而吸收光谱测量观察到了高含量银成分的样品中含有银纳米颗粒;样品的激发和发射光谱测量表明近紫外光可有效激发样品并产生覆盖几乎全部可见波段的发射;荧光衰减测量表明样品中含有多种 Ag 聚集体发光中心。计算了样品的发射色坐标,结果显示一定组分的 Eu<sup>3+</sup> 掺杂硼酸银可实现色坐标为(0.312,0.336),显色指数为88的白光发射。最后,利用390 nm 发射半导体二极管和30 mol % AgNO<sub>3</sub> 的玻璃样品成功制作了白光发射器件。

**关键词:**硼酸银玻璃;Eu<sup>3+</sup> 掺杂;Ag 聚集体;白光发光二极管(LED)

中图分类号:O482.3;TQ171.71 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0000

## Preparation and characterization of Eu<sup>3+</sup> doped silver borate glasses and their applications in white light emitting diodes

ZHAO Wen-qian, ZHANG Ying-hui\*, FU Shao-bo, CHEN Bao-jiu

(Department of Physics, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

\* Corresponding author, E-mail: yhzhang@dlmu.edu.cn

**Abstract:** The feasibility to produce white light emitting diodes by using glass phosphors was explored, and a series of Eu<sup>3+</sup> doped silver borate glasses with various silver contents were prepared via a melt-quenching technique. The structural, spectral and chromatic properties of the glasses were studied. X-ray diffraction (XRD) patterns indicate that there are no silver particles in glasses in the identifiable level that the XRD could reach, but absorption spectra exhibit the existence of silver nanoparticles in the glasses with higher silver contents. Furthermore, the excitation and emission spectra show that the glass samples can be effectively excited by near ultraviolet and can generate emissions covering almost full visible region. Fluorescence decays demonstrate that there are many types of silver aggregates in the glass samples. The color coordinate was calculated, and it shows that white light generation can be obtained from Eu<sup>3+</sup> doped silver borate glass samples with certain composition. Finally, a white emitting device was produced by using the glass with the color coordinate of (0.312,0.336) and a color rendering index of 0.88 and a 390 nm diode.

收稿日期:2015-06-19;修订日期:2015-07-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11374044, No. 11104023, No. 11104024, No. 11274057);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(No. 3132014087, No. 3132014327, No. 3132013100)

**Key words:** silver borate glass;  $\text{Eu}^{3+}$  doping; Ag aggregation; white Light Emitting Diode(LED)

## 1 引言

与白炽灯、荧光灯及高压气体放电灯等传统照明光源相比,荧光粉转换白光发光二极管(Light Emitting Diode, LED)由于具有可靠性高、节能、寿命长和安全等独特优点,被视作一种新型的理想固体光源而深受人们的关注与研究<sup>[1]</sup>,其性能也不断地在提高,并广泛应用于液晶显示器背光源、汽车照明光源、头灯及普通照明等领域<sup>[2]</sup>。目前,商用的白光LED通常是用蓝光LED芯片激发黄光发射YAG:Ce荧光粉( $\text{Ce}^{3+}$ 掺杂的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ )产生的黄光与其自身发射的蓝光混合成白光来实现<sup>[3,4]</sup>。YAG:Ce荧光粉具有蓝光激发效率高、在可见光区域具有宽带发射、荧光衰减较快、合成简单以及化学能和热能相对稳定等许多优良的特性。然而,该体系荧光粉在其光谱成分中缺少红光,因此利用YAG:Ce荧光粉的白光LED的显色性差,色温较高,所以还不能广泛应用到室内照明及高质量照明中。实现白光LED的另一种途径是利用近紫外发射LED芯片激发三基色发射荧光粉实现白光LED,或通过蓝光LED芯片激发红绿荧光粉来实现白光发射<sup>[5,6]</sup>,这样可有效提高红光发射成分,但是由于不同荧光粉的性能老化速率不同以及再吸收等问题,造成白光器件的性能不稳定。此外,多种荧光粉的应用使封装及颜色调整更加困难,产品的成本也会大大提高<sup>[7]</sup>。

为了改善这一问题,人们提出了采用单一基质荧光粉实现全色发射的解决方案。基于这一思路,一些研究者通过氮化和共掺杂的方法制成了绿色CSS: $\text{Ce}^{3+}$ 单一基质白光LED用荧光粉<sup>[8]</sup>。最近,研究人员又开发出了一种新的 $\text{Ba}_{0.93}\text{Eu}_{0.07}\text{Al}_2\text{O}_4$ 荧光粉<sup>[9]</sup>,该单一基质荧光粉实现了蓝光激发下的全色发射。然而,目前人们所获得的单一基质荧光粉存在着制作工艺复杂、成本高和荧光粉材料易老化等缺点。因此,研究和开发在近紫外光或蓝光激发下的稀土掺杂白光LED材料仍然是一个挑战。与荧光粉材料相比,稀土掺杂的玻璃材料具有耐腐蚀、热导率高、光传输特性好、制造过程简单、生产成本低、热稳定性良好等优

点。因此采用玻璃荧光体作为光转换材料实现白光器件,一方面可以避免封装胶的使用,提高了白光器件的散热性能;另一方面,可以很容易实现远场封装,替代封装树脂,提高了白光器件的老化性能<sup>[10-11]</sup>。硼酸盐玻璃作为氧化物玻璃中的一种,由于其熔点低,热膨胀系数低,耐高温等优点多年来一直受到人们的重视和研究<sup>[12-13]</sup>。

本文采用玻璃荧光体作为白光LED的光转换材料基质,根据已有报导以银聚集体作为发光集团<sup>[14-15]</sup>,利用 $\text{Eu}^{3+}$ 作为红色发射补充中心,合成了 $\text{Eu}^{3+}$ 掺杂的全色发射硼酸银玻璃材料。玻璃样品采用熔融淬火技术制备,采用XRD、吸收光谱、激发和发射光谱、荧光动力学测量等手段表征不同含银量的玻璃,最后选择合适组分的玻璃样品制备了全色发射白光器件。

## 2 实验

### 2.1 样品制备

使用分析纯的 $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{AgNO}_3$ 与光谱纯的 $\text{Eu}_2\text{O}_3$ 作为原材料制备玻璃样品。设计的玻璃样品的组成为 $(99-x)\text{B}_2\text{O}_3-x\text{AgNO}_3-1\text{Eu}_2\text{O}_3$ ( $x=10, 20, 30$ 或 $40$ ),分别将它们命名为G10, G20, G30和G40。首先,按化学计量比称量合计质量为5g的原材料,使用玛瑙研钵将其充分研磨混合均匀。然后装入刚玉坩埚,并移入高温电阻炉进行煅烧,煅烧温度为 $1200^\circ\text{C}$ ,煅烧时间为1h。将熔体快速倾倒在预热的铜模具上,并用铜板压制成型,待冷却至室温后,在 $300^\circ\text{C}$ 的电炉中退火4h,再冷却至室温,取出后按测量要求进行裁切和抛光。

### 2.2 样品表征

样品X射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)的测量设备为岛津XRD-6000X射线衍射仪,仪器采用 $\text{CuK}\alpha$ 射线( $\lambda=0.15406\text{nm}$ )作为辐射源,工作电流为30mA,工作电压为40kV,扫描速度为 $4^\circ/\text{min}$ ,测量的 $2\theta$ 角为 $10^\circ\sim 70^\circ$ 。样品的荧光衰减曲线使用爱丁堡LifeSpec II时间相关单光子计数系统进行测定,测量中使用的激发光源为EP-LED,使用的探测器为红光增强光电倍增管。采用日立F-4600荧光光谱仪测量样品的激发光

谱与发射光谱,采用光谱仪内置的 150 W 氙灯作为激发源,激发和发射狭缝分别设置为 10 nm 和 5 nm,光电倍增管电压为 400 V,扫描速度为 2 400 nm/min。所有的测试均在室温下进行。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 吸收光谱及 X 射线衍射分析

图 1 为不同样品在 300 ~ 650 nm 波段的吸收光谱图。随着原材料中 AgNO<sub>3</sub> 含量的增加,样品的吸收边向长波长方向移动;在波长 393 nm 和 464 nm 处可以观察到 Eu<sup>3+</sup> 弱的吸收峰,分别对应于<sup>7</sup>F<sub>0</sub>基态到激发态<sup>5</sup>L<sub>6</sub>和<sup>5</sup>D<sub>2</sub>的吸收跃迁。图 1 中 G40 样品在 400 nm 附近表现出了强的吸收,这一吸收是由于玻璃样品中存在银纳米粒子所导致的,即表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)吸收峰<sup>[16]</sup>;而其它样品在该光谱范围内的吸收较弱,这说明当样品中银组分含量较高时无需退火就会生长出银纳米粒子。为了进一步研究样品中银纳米粒子的情况,对样品进行了 XRD 测量,结果发现所有样品均表现出类似的衍射图样,只出现一个中心在 2θ = 30°附近的宽的衍射峰(作为代表,图 1 中的插图给出了 G40 样品的 XRD 图样),说明样品为典型的非晶态特性;没有观察到单质银纳米粒子的衍射峰,表明样品中银纳米粒子的含量较少,超出了 XRD 的探测极限,这一结果也说明用吸收光谱探测玻璃中银纳米粒子比 XRD 技术更有效。

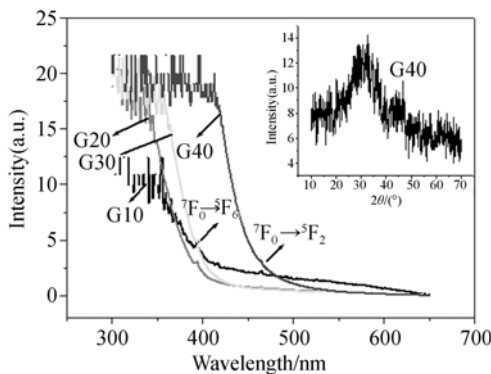


图 1 Eu<sup>3+</sup> 掺杂硼酸银玻璃的吸收光谱图,插图为 G40 样品的 XRD 图样

Fig. 1 Absorption spectra for Eu<sup>3+</sup> doped silver borate glasses, where inset is XRD pattern of G40 glass

#### 3.2 激发和发射光谱性质

图 2(a) 给出了不同样品的激发光谱图,监测波长为 615 nm,对应于 Eu<sup>3+</sup> 的<sup>5</sup>D<sub>0</sub>到<sup>7</sup>F<sub>2</sub>的跃迁。在 G10 样品的激发光谱图中可以看到它包含一个中心约在 250 nm 的宽带和一些在 300 ~ 500 nm 的锐线。这个宽带吸收来源于 Eu<sup>3+</sup> → O<sup>2-</sup> 电荷迁移跃迁形成的电荷迁移带,锐线吸收对应于 Eu<sup>3+</sup> 相应的 *f-f* 跃迁。最强的激发峰位于 395 nm 处 Eu<sup>3+</sup> 的<sup>7</sup>F<sub>0</sub>到<sup>5</sup>L<sub>6</sub>的跃迁。这里没有观察到在一些诸如 NaCl 和 LiCl 等的晶体中可以观察到的对应于 Ag<sup>+</sup> 的 4d<sup>10</sup> → 4d<sup>9</sup>5s 的跃迁吸收峰,这说明在该玻璃系统中 Ag<sup>+</sup> 的光学跃迁太弱了,因为 4d<sup>10</sup> → 4d<sup>9</sup>5s 的跃迁是宇称禁戒的。随着 AgNO<sub>3</sub> 含量的增加,在近紫外区出现了一个宽带,这个宽带激发峰的线宽逐渐变宽,并且其强度先升高后降低。这个宽带的激发峰不能单纯的理解为源于 Ag<sup>+</sup> 的吸收,因为单纯的 Ag<sup>+</sup> 吸收峰的中心波长通常在 300 nm 以下。因此这个激发峰为不同聚集状态的 Ag 聚集体的吸收,如 Ag<sub>2</sub><sup>+</sup>, Ag<sub>3</sub><sup>+</sup>, Ag<sub>4</sub><sup>+</sup> 等。这些多聚体形成不同的发光中心,导致了激发峰是宽带的,而不像三价稀土离子 *f-f* 的锐线跃迁<sup>[17]</sup>。随着样品组分中 AgNO<sub>3</sub> 含量的增加,玻璃中也会出现 Ag 高的聚集体,聚集体种类的增多导致吸收谱的展宽。

图 2(b) 为在 395 nm 激发下,不同样品的发

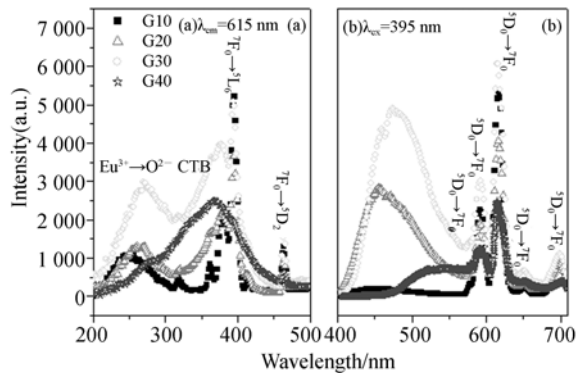


图 2 (a) 监测波长为 615 nm 时 Eu<sup>3+</sup> 掺杂硼酸银玻璃的激发光谱 (b) 激发波长为 395 nm 时 Eu<sup>3+</sup> 掺杂硼酸银玻璃的发射光谱

Fig. 2 (a) Excitation spectra of Eu<sup>3+</sup> doped silver borate glasses by monitoring 615 nm emission, (b) Emission spectra Eu<sup>3+</sup> doped silver borate glasses under 395 nm excitation

射光谱。图 2(b) 中波长在 580, 592, 616, 653 和 700 nm 的锐线发射峰分别对应于  $\text{Eu}^{3+}$  的  $^5\text{D}_0$  能级到  $^7\text{F}_0, ^7\text{F}_1, ^7\text{F}_2, ^7\text{F}_3$  和  $^7\text{F}_4$  的跃迁。宽带发射则是不同聚集状态的 Ag 聚集体的发射。从图中可以看出, 随着样品中 Ag 组分的增加, 样品的宽带发射光谱中心逐渐红移并且展宽, 这也印证了随着 Ag 组分的增加样品中聚集体种类和聚集度的增加。另外, 随着 Ag 组分的增加(从 G20 到 G40 样品), 样品总的宽带发射强度却降低了, 这主要是由发光中心的浓度猝灭和自吸收所导致的。值得注意的是,  $\text{Eu}^{3+}$  掺杂的 G30 玻璃包含了几乎全部的可见光区域发射并且总的发光强度也最强, 这有利于它在固态照明中的应用。

### 3.3 样品色品坐标

由于白光 LED 荧光材料的色度学性能也是制约器件应用的一个重要方面, 为了进一步评价其色度学性质, 这里使用强度校正的发射光谱计算了不同样品在 395 nm 激发下的色坐标<sup>[18]</sup>, 其结果如图 3 所示(彩图见期刊电子版)。随着原材料中  $\text{AgNO}_3$  含量的增加, 样品的发光颜色由橙红色(G10)、蓝色(G20)逐渐移向白光区(G30), 最后进入橙色区域(G40)。其中, G30 样品的色坐标值( $x=0.293, y=0.303$ )与标准白光点( $x=0.333, y=0.333$ )非常接近。这些结果表明  $\text{Eu}^{3+}$  掺杂硼酸银玻璃可以与近紫外 LED 芯片复合制作白光 LED 照明光源。此外, 可以通过改变玻璃的组成和  $\text{Eu}^{3+}$  的掺杂浓度来调节发光的颜色。

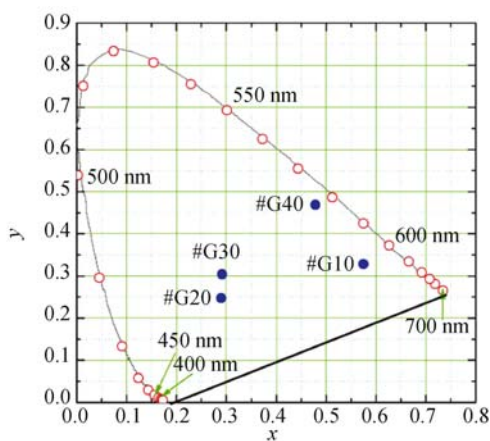


图 3 395 nm 激发下不同样品的色品坐标图

Fig. 3 Color coordinates for all samples derived from emission spectra under 395 nm excitation

### 3.4 银聚集体发光动力学特性

实验测量了 G30 样品的荧光衰减曲线, 得到的激发波长为 340 nm, 监测波长分别为 430, 450, 480, 520, 550 和 600 nm。将不同波长的荧光衰减曲线绘制在图 4 中。从图中可以看出, 不同波长处的荧光衰减均为非指数形式, 这一方面说明宽带发射可能由多种发光中心组成, 另一方面说明各发光中心间可能存在能量传递行为。这一结果也说明了在 G30 样品中存在复杂的 Ag 聚集体发光中心。从图 2(b) 的发射光谱中也可以推断出宽带的发射是由不同 Ag 聚集状态的发光中心的发射相互叠加而成的。

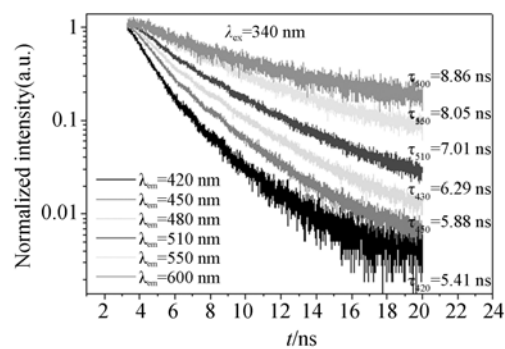


图 4 G30 样品的荧光衰减曲线

Fig. 4 Fluorescence decay curves of G30 sample

### 3.5 激发波长对样品的色度学性质影响

图 5 为 G30 样品在不同激发波长下的发射光谱, 所使用的激发波长分别为 270, 300, 330, 360, 390 和 420 nm。在所有这些发射光谱中都能看到 Ag 聚集体的宽带发射和  $\text{Eu}^{3+}$  的特征发射峰, 图 5 的插图为积分强度随激发波长的变化情况。插图反映出 G30 样品可以被 270 ~ 400 nm 的光有效激发。对不同激发波长下 G30 样品的色温、色坐标和显色指数进行了计算, 将计算出的结果列于表 1, 表 1 中第一列为激发波长, 第二列为计算得到的色温, 第三列为计算得到的色坐标, 第四列为显色指数。从表 1 中可以看出, 在 330 nm 激发下 G30 样品的色温为 6 500 K,  $x, y$  色品坐标为 (0.312, 0.336), 显色指数为 88, 显示出较好的色度学效果。表 1 的结果表明, 该系列样品可通过选择不同的激发波长实现不同色度学性能的器件, 其中色温从 4 000 ~ 8 000 K 可调, 同时显色指数最高为 88。

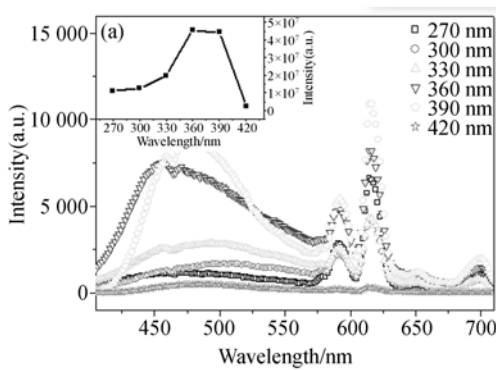


图 5 不同激发波长下 G30 样品的发射光谱

Fig. 5 Emission spectra of G30 sample under different excitation wavelengths

表 1 不同激发波长下 G30 样品的色温、色坐标及显色指数  
Tab. 1 Color temperature, coordinates and CRI for G30 sample under different excitation wavelengths

激发波长/nm	色温/K	色坐标	显色指数
300	4 400	(0.366,0.367)	10
330	6 500	(0.312,0.336)	88
390	8 000	(0.292,0.304)	71
395	8 500	(0.292,0.303)	69

为了验证这些样品的实际应用性能,本文利用 G30 样品和 390 nm 发射 LED 制作了简易的白光器件。该白光器件是把 G30 样品直接覆盖在 390 nm LED 前端,LED 的侧面采用黑色电工胶带封闭,器件插入面包板上,接上直流电源。当输入功率大约为 20 mW 时,可以观察到较强的白光发射。图 6 为所制备的白光 LED 工作时的数码照片,照片中央为白光器件,可以看到非常明亮的白光,照片中白光 LED 周围的紫色光是由于 LED 背面发出的紫色光经周围环境反射后产生的。从这一原理性器件可以看出,利用本文所制备的玻璃荧光体材料实现白光 LED 是非常可能的。

#### 参考文献:

- [1] LIU Y F, ZHANG X, HAO Z D, *et al.*. A new dual-emission phosphor  $\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_7\text{F}_2:\text{Ce}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$  with energy transfer for near-UV LEDs [J]. *Materials Letters*, 2012, 77(15): 45-47.
- [2] 邵文尧,何彩云,胡超群,等. LED 发光材料的制备及应用前景[J]. *化工技术与开发*, 2014, 43(6): 51-55.

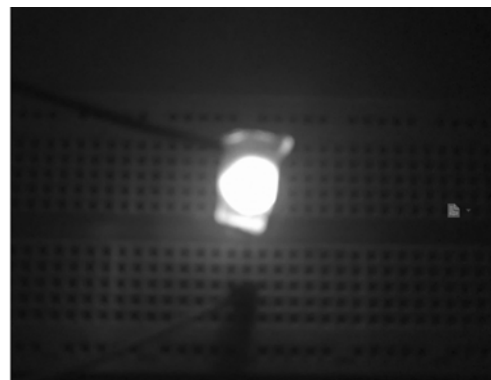


图 6 G30 样品与商用 LED( ~390 nm) 简易封装的白光器件

Fig. 6 Image of WLED produced by using G30 sample and 390 nm LED

## 4 结 论

本文设计了一种  $\text{Eu}^{3+}$  掺杂的硼酸银玻璃体系,采用传统的高温熔融淬火技术制备了含不同银组分的玻璃样品。采用 XRD 没有探测到玻璃样品中的银纳米粒子,而吸收光谱中观察到了  $\text{AgNO}_2$  摩尔浓度为 40% 的样品中存在银纳米粒子。测量了  $\text{Eu}^{3+}$  掺杂的不同组分硼酸银样品的激发谱与发射谱,从激发谱中的宽带激发得出了 Ag 聚集体的存在,并且随着  $\text{AgNO}_3$  含量的增加,玻璃中银元素的聚集度提高;发射光谱也反应出了不同形态银聚集体的存在。采用荧光动力学测量证明了玻璃的宽带发射来源于多种发光中心,发光中心存在自吸收及能量传递的相互作用。计算了样品的发射色坐标,发现一定组分的样品可实现色坐标为(0.312,0.336),显示指数为 88 的高质量白光发射。最后,采用 390 nm LED 和  $\text{AgNO}_3$  摩尔浓度为 30% 的玻璃样品组合制作了白光 LED 原理性器件。

- SHAO W R, HE C Y, HU CH Q, *et al.*. Preparation and application prospect of LED light-emitting materials [J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2014, 43(6): 51-55. (in Chinese)
- [3] SETLUR A A. Phosphors for LED-based solid-state lighting[J]. *Electrochemical Society Interface*, 2009, 18: 32-36.
- [4] LE TOQUIN R, CHEETHAM A K. Red-emitting cerium-based phosphor materials for solid-state lighting ap-

- lications[J]. *Chemical Physics Letters*, 2006,423(4-6): 352-356.
- [5] 殷录桥,翁菲,宋朋,等. LED芯片与YAG荧光粉的相互热作用[J]. *光学学报*, 2014,34(4):1-7.  
YIN L Q, WENG F, SONG P, *et al.*. Thermal interact effects of LED chip with YAG phosphor layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014,34(4): 1-7. (in Chinese)
- [6] PARK J Y, LEE J H, RAJU G S R, *et al.*. Synthesis and luminescent characteristics of yellow emitting Gd-Sr<sub>2</sub>AlO<sub>5</sub>: Ce<sup>3+</sup> phosphor for blue light based white LED [J]. *Ceramics International*, 2014, 40 (4): 5693-5698.
- [7] SETLUR A A, SHIANG J J, HANNAH M E, *et al.*. Phosphor quenching in LED packages; measurements, and paths forward[J]. *SPIE*, 2009,7422,74220E: 1-8.
- [8] 乔君. 钪硅酸盐白光LED荧光粉的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.  
QIAO J. *Studies on Scandium Silicate Phosphors for White LEDs* [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [9] LI X F, JOHN D BU DAI, LIU F, *et al.*. New yellow Ba<sub>0.93</sub>Eu<sub>0.07</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> phosphor for warm-white light-emitting diodes through single-emitting-center conversion [J]. *Light Science & Applications*, 2013,2(1): 1-8.
- [10] 陆晓军. 稀土掺杂长余辉发光玻璃的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006.  
LU X J. *Study of Rare Earth Ions Doped Long Luminescence Glass* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [11] 梁晓雷. 白光LED用稀土离子/过渡金属离子掺杂发光玻璃的制备及性能研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2010.  
LIANG X L. *Study on the Preparation of Rare Earth Ions/Transition Metal Ions Doped Luminescence Glass for W-LED Applications* [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] ZHU D M, LOU X, LUO F, *et al.*. Preparation and properties of borate glass coatings on Ti-based alloy substrate[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, S1: 766-769.
- [13] BROW R K, SAHA S K, GOLDSTEIN J I. Interfacial reactions between titanium and borate glass[C]. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1993, 314: 77-81.
- [14] 李晓坤,张友林,孔祥贵. Ag纳米粒子聚集体的SiO<sub>2</sub>包覆及其SERS效应[J]. *发光学报*, 2014,35(7): 853-857.  
LI X K, ZHANG Y L, KONG X G. Aggregation of Ag nanoparticles coated with silica and its SERS effect[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014,35(7): 853-857. (in Chinese)
- [15] 杨艳民,陈宝玖,王成. 玻璃中银粒子对稀土离子发光影响的研究[J]. *中国稀土学报*, 2008,26(2): 213-216.  
YANG Y M, CHEN B J, WANG CH. Effect of silver particles on spectroscopic properties of rare earth in glasses[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2008,26(2): 213-216. (in Chinese)
- [16] 刘惠玉,陈东,高继宁,等. 贵金属纳米材料的液相合成及其表面等离子体共振性质应用[J]. *化学进展*, 2006,18(7/8): 889-896.  
LIU H Y, CHEN D, GAO J N, *et al.*. Liquid phase fabrication of noble metal nanomaterials and their surface plasmon resonance-based applications[J]. *Progress in Chemistry*, 2006, 18 (7/8): 889-896. (in Chinese)
- [17] 张金苏. 晶体中稀土离子f-f跃迁光谱强度的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.  
ZHANG J S. *Spectral Intensities of f-f Transitions in Rare-Earth Ions Doped Crystals* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [18] LI P L, XU Z, ZHAO S L, *et al.*. Enhancement of green emission by the codoping A<sup>+</sup> (A = Li, Na, K) in Ca<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>Cl : Tb<sup>3+</sup> phosphor [L]. *Chinese Physics B*, 2013,22(8):0878031-4.

#### 作者简介:



赵文倩(1990-),女,山西朔州人,硕士研究生,2014年于忻州师范学院获得学士学位,主要研究方向为稀土发光材料的制备与光谱性质的研究。E-mail: zhaowq@dlmu.edu.cn