

# CaLaGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub>:Dy<sup>3+</sup>荧光粉的光致和阴极射线发光性能

赵文玉<sup>①②</sup>, 安胜利<sup>①</sup>, 樊彬<sup>①</sup>, 李松波<sup>①</sup>, 戴亚堂<sup>③</sup>

① 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083;

② 内蒙古科技大学化学与化工学院, 包头 014010;

③ 西南科技大学材料科学与工程学院, 绵阳 621000

E-mail: zhaowenyu2011@hotmail.com

2011-07-14 收稿, 2011-10-19 接受

内蒙古自然科学基金(20080404MS0204)、国家高技术研究发展计划(2008AAXX0310)和内蒙古科技大学创新基金(2010NC026)资助

**摘要** 采用化学共沉淀法制备单一基质 CaLaGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub>:Dy<sup>3+</sup>白色荧光粉, 借助场发射扫描电子显微镜(field emission scanning electron microscopy, FE-SEM), X-射线衍射(X-ray diffraction, XRD), 激光粒度仪, 光致发光(photoluminescence, PL)和阴极射线发光(cathodoluminescence, CL)光谱对其结构和光学性能进行研究. 结果表明, 样品由一些黏结在一起的近球形颗粒组成, 有轻微的团聚现象, 平均粒径约为 1.0 μm. Dy<sup>3+</sup>离子作为发光中心取代 CaLaGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 晶格中的 La<sup>3+</sup>离子, 其对称格位为 C<sub>s</sub>. 在紫外光和低压电子束的激发下, CaLaGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub>:Dy<sup>3+</sup>荧光粉表现出 Dy<sup>3+</sup>的特征发射(<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>-<sup>6</sup>H<sub>15/2</sub> 跃迁和 <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>-<sup>6</sup>H<sub>13/2</sub> 跃迁), 其最强发射峰为 573 nm(黄光). 样品的色坐标均位于白光区域, 并讨论了发光机理. 此荧光粉可被应用于场发射显示器(field emission displays, FEDs)和白光发光二极管(light-emitting diodes, LED)中.

**关键词**

荧光粉  
阴极射线发光  
光致发光  
FEDs

目前, 稀土荧光粉由于具有优异的发光特性、好的稳定性、高的发光效率、强的蓝光或紫外发射带以及在电子束激发下无气体放出等优点而被广泛应用于场发射显示器(FEDs)和白光 LED 中<sup>[1,2]</sup>. 在这些稀土荧光粉中, 主要以硫化物、氮化物、氧化物或氮氧化物等荧光粉为主. 然而, 在电子束激发下, 硫化物荧光粉容易分解, 产生硫化物气体. 这不仅毒化阴极, 而且降低自身的发光效率<sup>[3,4]</sup>. 而氮化物和氮氧化物荧光粉的制备条件比较苛刻, 对设备的要求也高<sup>[5]</sup>. 因此, 研发无污染、相对廉价、容易制备、稳定性好和发光效率高的稀土氧化物荧光粉具有更大的应用前景<sup>[6,7]</sup>.

镓酸镧钙 CaLaGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 属于四方晶系, 其空间群为 P $\bar{4}$ 2<sub>1</sub>m. 在此晶格中, GaO<sub>4</sub>层处于 ab 面上; 层与层之间, 二价的 Ca 和三价的 La 随机分布于八配位体中, 其对称性为 C<sub>s</sub><sup>[8]</sup>. 然而, 到目前为止, 很少有关于 CaLaGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 基荧光粉的相关报道. 对于荧光粉的

制备, 大部分荧光粉利用传统的高温固相法. 然而, 由于混料的不均匀和低的反应速率, 此法制备的荧光粉形貌不均匀, 团聚现象严重和硬度大, 并且后续的研磨处理也会降低其发光效率. 相对而言, 化学共沉淀法可以克服以上缺点. 另外, 作为发光中心, Dy<sup>3+</sup>离子由于自身的白光发射(由位于 470~500 nm 的 <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>-<sup>6</sup>H<sub>15/2</sub> 跃迁和位于 570~600 nm 的 <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>-<sup>6</sup>H<sub>13/2</sub> 跃迁组成)而备受关注<sup>[9,10]</sup>. 因此, 本文利用化学共沉淀法制备 CaLaGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub>:Dy<sup>3+</sup>白光荧光粉, 并对其光致发光(PL)和阴极射线发光(CL)性能进行研究.

## 1 实验

(i) 样品制备. 实验以草酸(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)为沉淀剂, 采用化学共沉淀法制备 CaLaGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub>:Dy<sup>3+</sup>荧光粉, 并利用单因素实验得到最佳的摩尔掺杂浓度为 5%. 量取 5 mL Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (1 mol/L), 4.95 mL La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (1 mol/L), 5 mL Ga(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (1 mol/L)和 0.5 mL Dy(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (0.1 mol/L)

**英文版见:** Zhao W Y, An S L, Fan B, et al. Photoluminescence and cathodoluminescence properties of a novel CaLaGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub>:Dy<sup>3+</sup> phosphor. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-011-4938-5

溶液, 置于 100 mL 烧杯中形成硝酸混合液. 在磁力搅拌下, 将硝酸盐混合液滴加到 25 mL 草酸溶液(1 mol/L). 通过 25%的氨水调节 pH 为 10~12. 反应 4 h 后, 经过过滤、去离子水和乙醇洗涤、80℃真空干燥 4 h 后得到白色物质. 最后, 将白色物质在 1100℃下煅烧 3 h 后得到所需荧光粉  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$ . 为了与样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  进行对比, 本文采用 Pechini 溶胶-凝胶法制备  $\text{LaOCl}:2\%\text{Dy}^{3+}$  荧光粉<sup>[11]</sup>.

(ii) 样品表征. 通过 JEOL JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)对样品的形貌进行观察; 利用 Mastersizer 2000 测试样品的粒径分布; 采用日本理学 D/max-III B 型 X-射线衍射仪对样品进行物相分析, 以铜为靶材料, 波长为 0.15405 nm, 管电压为 35 kV, 管电流为 60 mA; 利用日立 F-4500 荧光光谱仪测试样品的光致发光光谱(PL), 光源为 150 W 氙灯. 样品的阴极射线发光性能是在一个超高真空室 ( $<8.0 \times 10^{-4}$  Pa) 中, 通过日立 F-4500 荧光光度仪作为接收器来测试样品的发射光谱, 其中, 测试电压为 1~6 kV, 灯丝电流可调. 所有测试均在室温下进行.

## 2 结果与讨论

图 1 和 2 分别为样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的 FE-SEM 和粒度分布. 由图 1 可见, 样品由一些黏结在一起的近球形颗粒组成, 有轻微的团聚现象. 结合图 2, 样品的粒度分布范围比较窄, 平均粒径约为 1.0  $\mu\text{m}$ . 根据我们的实践经验, 这些性能有利于 FEDs 的涂屏.

样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的 XRD 与  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7$  的标准 JCPDS (No.39-1127) 的比较见图 3. 样品的衍射峰位置与  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7$  的标准卡非常吻合. 3 个强

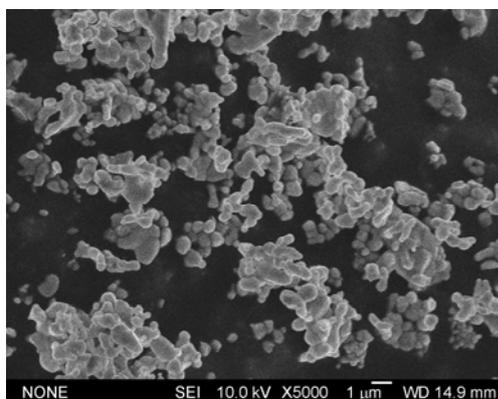


图 1 样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的 FE-SEM 照片

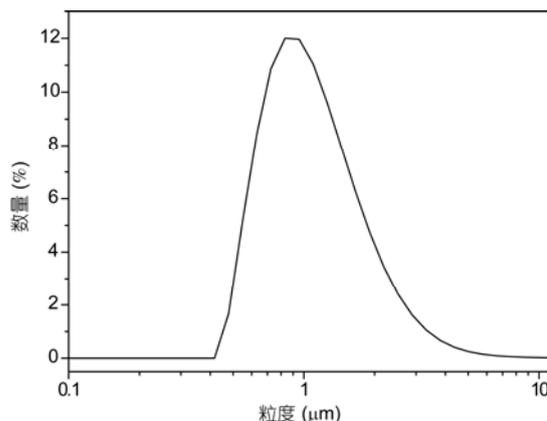


图 2 样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的粒度分布

峰的  $2\theta$  值为  $30.283^\circ$ ,  $35.655^\circ$  和  $50.069^\circ$ , 分别对应于  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7$  (JCPDS No.39-1127) 的 (311), (420) 和 (422) 晶面, 没有其他杂质峰的出现, 这说明  $\text{Dy}^{3+}$  离子完全进入到  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7$  晶格中. 普遍认为, 当离子半径相近、价态相同时, 不同离子之间会相互取代. 在  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7$  的晶格中,  $\text{La}^{3+}$  离子与 8 个氧离子配位, 占据  $\text{C}_s$  格位. 因为  $\text{Dy}^{3+}$  (配位数  $N=8$ , 半径  $r=102.7$  pm) 和  $\text{La}^{3+}$  ( $N=8$ ,  $r=116$  pm) 具有相近的半径和相同的价态, 所以  $\text{Dy}^{3+}$  取代  $\text{La}^{3+}$  并占据  $\text{C}_s$  格位<sup>[12,13]</sup>. 根据 chekcell 软件 (Collaborative Computational Project Number 14 (CCP14); <http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/lmgp-laugier-bochu/>) 计算, 样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的晶胞参数为  $a=11.249$  Å,  $c=5.251$  Å,  $V=664.5$  Å<sup>3</sup>. 与  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7$  标准卡 (JCPDS No.39-1127,  $a=11.252$  Å,  $c=5.273$  Å,  $V=667.2$  Å<sup>3</sup>) 相比, 样品的晶

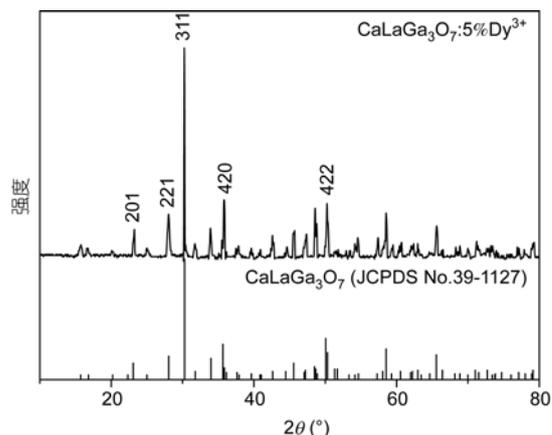


图 3 样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的 XRD 图与  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7$  标准卡 JCPDS (No.39-1127) 图

胞参数相对较小,这是由于  $\text{La}^{3+}$  被较小半径  $\text{Dy}^{3+}$  取代造成的.

图 4 为样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的激发光谱 ( $\lambda_{\text{em}}=573 \text{ nm}$ ). 由图 4 可见, 激发光谱由一些锐利峰组成, 其中, 以 349 nm 激发为主. 很明显, 这些激发峰对应于  $\text{Dy}^{3+}$  的 f-f 特征跃迁, 如 324, 349, 362, 386, 426 和 452 nm 激发峰分别对应于  ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^5\text{P}_{3/2}$ ,  ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{M}_{21/2}$ ,  ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{P}_{7/2}$ ,  ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ ,  ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{G}_{11/2}$  和  ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  跃迁<sup>[14]</sup>. 由此可见, 通过 UV 芯片和蓝光芯片, 可以将这些激发能转变为可见光.

图 5 为样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的发射光谱 ( $\lambda_{\text{ex}}=349 \text{ nm}$ ). 发射光谱仅由  $\text{Dy}^{3+} 4f^9$  电子组态的 f-f 跃迁形成, 即在蓝色区域的  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$  (476, 487, 495 nm) 跃迁和黄色区域的  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$  (573 nm) 跃迁.  $\text{Dy}^{3+}$  的磁偶极跃迁  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$  几乎不受晶体场的影响. 根据选择定则  $\Delta J=2$ , 受迫电子跃迁  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$  属于灵敏跃迁. 当  $\text{Dy}^{3+}$  占据低对称或无对称的格位时, 将以超敏跃迁  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$  为主<sup>[15,16]</sup>. 因此, 根据图 5 可知,  $\text{Dy}^{3+}$  占据低对称或无对称的格位. XRD 分析表明,  $\text{Dy}^{3+}$  在基质  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7$  中占据  $\text{C}_s$  格位, 因此,  $\text{Dy}^{3+}$  的对称性仍保持  $\text{C}_s$  对称. 另外, 当  $\text{Dy}^{3+}$  取代  $\text{La}^{3+}$  时,  $\text{Dy}^{3+}$  半径略小于  $\text{La}^{3+}$  也会降低  $\text{Dy}^{3+}$  的对称性, 有利于  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$  跃迁, 增强黄色发光. 由此可见,  $\text{Dy}^{3+}$  离子占据非严格对称的格位.

图 6 为样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  和荧光粉  $\text{LaOCl}:2\%\text{Dy}^{3+}$  的 CL 光谱. 样品的 CL 光谱主要由位于 385 nm 宽带以及位于蓝色 (470~500 nm) 和黄色区域 (560~600 nm) 的 2 个较强发射带组成. 其中, 488 nm 为中心

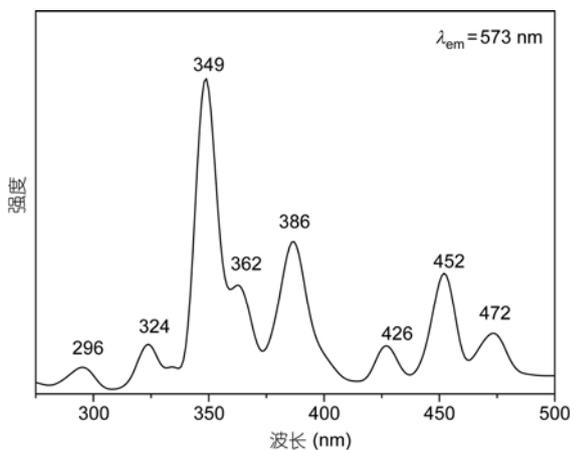


图 4 样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的激发光谱

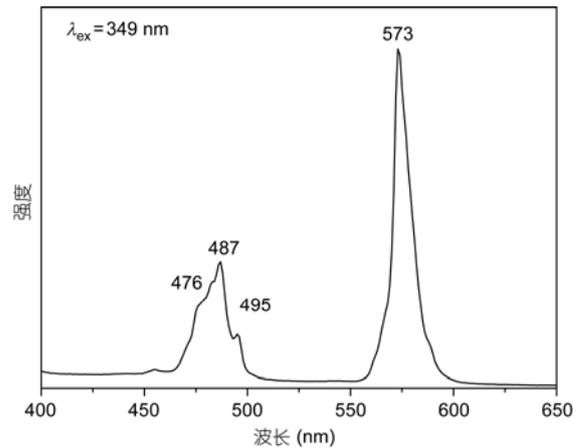


图 5 样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的发射光谱

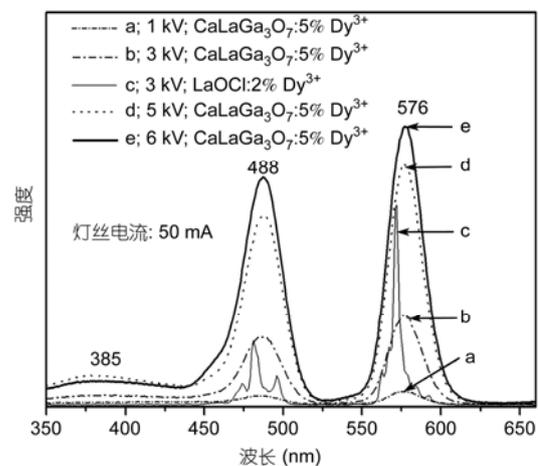


图 6 样品  $\text{CaLaGa}_3\text{O}_7:5\%\text{Dy}^{3+}$  的 CL 光谱 (加速电压为 1, 3, 5, 6 kV) 和荧光粉  $\text{LaOCl}:2\%\text{Dy}^{3+}$  的 CL 光谱 (加速电压为 3 kV)

的蓝光发射和 576 nm 为黄色的黄光发射分别对应于  $\text{Dy}^{3+}$  的  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$  和  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$  跃迁. 385 nm 的宽带发射归因于八面体  $\text{GaO}_6$  基团的自发光<sup>[3]</sup>和/或扭曲 Ga-八面体结构中 Ga 的  ${}^4\text{T}_{2B}$  到  ${}^4\text{A}_2$  能级跃迁<sup>[17]</sup>. 除了 385 nm 宽带发射和  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2,13/2}$  跃迁发射比例不同外, CL 光谱和 PL 光谱有些相似.  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2,13/2}$  跃迁发射比例不同可能归因于仪器响应不同或 PL 和 CL 的发光机理不同.

在 PL 中, 紫外光或可见光被用来激发发光材料, 其激发能仅有 4~6 eV. PL 发光中心可以被紫外光直接激发, 如 349 nm. 激发以后, 大部分能量传递到  $\text{Dy}^{3+}$  的  ${}^4\text{F}_{9/2}$  能级, 最终表现出  $\text{Dy}^{3+}$  的特征发射, 如图 5 所示. 在此过程中, 晶体场的影响和  $\text{Dy}^{3+}$  的能级分裂是不能被忽略的. 然而, 对于电子束激发的 CL 荧

光粉, 发光方式有两种途径: (1) 直接发光, (2) 间接发光<sup>[18]</sup>. 在加速电压的作用下, 阴极产生许多高达几千电子伏的高能电子. 当它们与CL荧光粉作用时, 将会穿透到发光材料内部并进入到晶格中, 产生离化现象. 这个过程中将生成大量的二次电子, 二次电子再经过离化形成更多的二次电子<sup>[19]</sup>. 当低能量的电子与发光中心作用时, 可能直接激发发光, 即直接发光. 另外, 通过碰撞, 在二次电子的形成中伴随着大量电子-空穴对(electron-hole pairs, EHs)的生成. 这些 EHs 不会很快在基质中直接复合, 它们会在基质内部移动, 最终与发光中心或  $Ga^{3+}$  离子复合. 这样的复合一旦形成, 能量将通过谐振或准谐振的形式传递给  $Dy^{3+}$  的 4f 能级上, 最终表现出  $Dy^{3+}$  的特征发射. 另外, 这些能量也会引起电子从  $Ga^{3+}$  的  $^4A_2$  能级跃迁到  $^4T_{2B}$  能级上, 形成宽带发射. 由此可见, 在 CL 过程中,  $Dy^{3+}$  受晶格场的影响和自身能级的分裂显得不那么重要.

根据图 6 可见, 在维持束流(50 mA)不变的情况下, 随着电压从 1.0 增加到 6.0 kV, CL 发光强度逐渐增加, 这是由于电子穿透深度不同造成的. 根据电子穿透深度公式  $L(\text{Å})=250(A/\rho)(E/Z^{1/2})^n$ ,  $n=1.2/(1-0.29\lg Z)$ ,  $A$  表示分子量,  $\rho$  为荧光粉密度,  $Z$  表示原子数或电子数,  $E$  表示电压(kV)<sup>[20]</sup>. 对于样品  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$ ,  $Z=226$ ,  $A=500.15$ ,  $\rho=4.974 \text{ g/cm}^3$ , 在 1.0, 3.0, 5.0 和 6.0 kV 激发下, 电子的穿透深度分别为 0.9, 5.7, 39.1 和 78.0 nm. 因此, 随着电压的增加, 电子的穿透深度逐渐增加, 将会有更多的发光中心被激发发光, CL 发光强度得到提高.

此外, 对于 CL, 不存在量子效率( $q$ ). 辐射效率( $\eta$ )定义为发光材料发射能量与接受能量的比例. 发光效率( $L$ )定义和 PL 中发光效率的定义相同<sup>[21]</sup>, 即为辐射光通量与吸收能量的比例. 在一般情况下, 光通量  $\Phi(\nu)$  为光谱功率分布与视觉函数曲线  $V(\lambda)$  乘积的积分, 再乘以比例系数  $K_m$ <sup>[22]</sup>. 这说明,  $\Phi(\lambda)$  与 CL 发光强度(高度)成正比. 因此, 对于  $CaLaGa_3O_7:Dy^{3+}$  和  $LaOCl:Dy^{3+}$  荧光粉, 辐射效率( $\eta$ )可以粗略地通过 CL 发光面积进行比较<sup>[3,11]</sup>. 发光效率( $L$ )可以粗略地通过 CL 发光强度与视觉函数曲线  $V(\lambda)$  乘积的积分. 根据图 6,  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  荧光粉(3 kV, 曲线 b)的发光面积高于  $LaOCl:2\%Dy^{3+}$  荧光粉(3 kV, 曲线 c).  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  的 CL 发光强度与视觉函数曲线

$V(\lambda)$ 乘积的积分小于  $LaOCl:2\%Dy^{3+}$ . 由此可知, 虽然  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  的发光效率( $L$ )低于  $LaOCl:2\%Dy^{3+}$ , 但是辐射效率( $\eta$ )大于  $LaOCl:2\%Dy^{3+}$ .

图 7(A)~(E)分别为样品  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  在 349 nm, 1.0, 3.0, 5.0 和 6.0 kV 激发下的 CIE 坐标. 由图 7 可见, 样品  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  的色坐标接近于白光区域. 根据 PL 光谱, 样品  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  作为白光荧光粉应用于 UV 芯片和蓝光芯片中. 相对于黄色荧光粉  $LaOCl:2\%Dy^{3+}$ , 在电子束激发下, 样品  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  色坐标位于白光区域. 所以, 样品  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  也可以作为白色荧光粉应用于场发射显示器(FEDs)中.

### 3 结论

通过化学共沉淀法制备了球形或近球形荧光粉  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$ . FE-SEM 和激光粒度测试表明, 粒度分布较窄, 以 1.0  $\mu\text{m}$  为中心. XRD 分析说明,  $Dy^{3+}$  完全进入到基质  $CaLaGa_3O_7$  的晶格中. PL 和 CL 光谱表明,  $Dy^{3+}$  在晶格中占据非对称的格式, 以  $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$  跃迁为主. 由于发光机理不同, PL 和 CL 光谱稍有不同. 样品  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  辐射效率高于黄色荧光粉  $LaOCl:2\%Dy^{3+}$ . 在紫外光(349 nm)和低电子束激发下(1.0~6.0 kV), 样品  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  表现出白光发射. 这些优异的性能表明, 此荧光粉可应用于显示或照明领域, 如 FEDs 和白光 LED 领域.

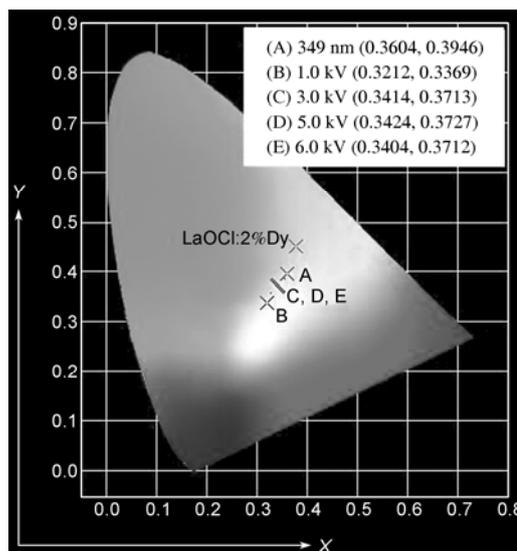


图 7  $CaLaGa_3O_7:5\%Dy^{3+}$  和  $LaOCl:2\%Dy^{3+}$  样品的 CIE 坐标

## 参考文献

- 1 Feng G, Jiang W H, Chen Y B, et al. A novel red phosphor  $\text{NaLa}_4(\text{SiO}_4)_3\text{F}:\text{Eu}^{3+}$ . *Mate Lett*, 2011, 65: 110–112
- 2 Ding W J, Wang J, Zhang M, et al. A novel orange phosphor of  $\text{Eu}^{2+}$ -activated calcium chlorosilicate for white light-emitting diodes. *J Solid State Chem*, 2006, 179: 3582–3585
- 3 Liu X M, Lin J.  $\text{LaGaO}_3: \text{A}$  ( $\text{A}=\text{Sm}^{3+}$  and/or  $\text{Tb}^{3+}$ ) as promising phosphors for field emission displays. *J Mater Chem*, 2008, 18: 221–228
- 4 Li L, Yang R X, Du Z, et al. Luminescent research of  $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}^{2+}$  blue phosphor used for electron beam excitation. *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 1558–1560
- 5 Xie R J, Li Y Q, Hirotsuki N, et al. *Nitride Phosphors and Solid State Lighting*. New York: CRC Press, 2011. 184–194
- 6 Bandi V R, Nien Y T, Chen I G. Enhancement of white light emission from novel  $\text{Ca}_3\text{Y}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Dy}^{3+}$  phosphors with  $\text{Ce}^{3+}$  ion codoping. *J Appl Phys*, 2010, 108: 023111–023114
- 7 Yokota H, Yoshida M, Ishibashi H, et al. Cathodoluminescence of Ce-doped  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  and  $\text{Gd}_{0.33}(\text{SiO}_4)_6\text{O}_2$  phosphor under continuous electron irradiation. *J Alloy Compd*, 2011, 509: 800–804
- 8 Ryba-Romanowski W, Gob S, Pisarski W A, et al. Investigation of  $\text{Eu}^{3+}$  sites in  $\text{SrLaGa}_3\text{O}_7$ ,  $\text{SrLaGaO}_4$  and  $\text{SrLaAlO}_4$  crystals. *J Phys Chem Solids*, 1997, 58: 639–645
- 9 Chen L M, Liu G C, Liu Y N, et al. Synthesis and luminescence properties of  $\text{YVO}_4:\text{Dy}^{3+}$  nanorods. *J Mater Process Tech*, 2008, 198: 129–133
- 10 Shinde K N, Nagpure I M, Dhoble S J, et al.  $\text{Dy}^{3+}$  emission in  $\text{M}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$  ( $\text{M}=\text{Ca}, \text{Ba}$ ) phosphor. *Indian J Phys*, 2009, 83: 503–509
- 11 Li G G, Li C X, Zhang C M, et al.  $\text{Tm}^{3+}$  and/or  $\text{Dy}^{3+}$  doped  $\text{LaOCl}$  nanocrystalline phosphors for field emission displays. *J Mater Chem*, 2009, 19: 8936–8943
- 12 Caponetti E, Saladino M L, Serra F, et al. Co-precipitation synthesis of Nd:YAG nano-powders: The effect of Nd dopant addition with thermal treatment. *J Mater Sci*, 2007, 42: 4418–4427
- 13 苏锵. 稀土化学. 郑州: 河南科学技术出版社, 1993. 8–12
- 14 Omkaram I, Buddhudu S. Photoluminescence properties of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$  powder phosphor. *Opt Mater*, 2009, 32: 8–11
- 15 Vengala R B, Buddhudu S. Emission analysis of  $\text{Dy}^{3+}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  powder phosphor. *Spectrochim Acta A*, 2008, 71: 951–953
- 16 Meng J X, Yang C T, Chen Q Q. Photoluminescence characterization of  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Dy}^{3+}$  doped  $\text{Li}_2\text{CaGeO}_4$  phosphors. *J Lumin*, 2010, 130: 1320–1323
- 17 Yang S H. Indium- and tungsten-doped  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  phosphor. *J Electron Mater*, 2004, 33: 1–4
- 18 Ozawa L. *Cathodoluminescence and Photoluminescence: Theories and Practical Applications*. New York: CRC Press, 2007. 8–9
- 19 Yang J, Zhang C M, Li C X, et al. Energy transfer and tunable luminescence properties of  $\text{Eu}^{3+}$  in  $\text{TbBO}_3$  microspheres via a facile hydrothermal process. *Inorg Chem*, 2008, 47: 7262
- 20 Liu X M, Yan L S, Lin J. Synthesis and luminescent properties of  $\text{LaAlO}_3:\text{RE}^{3+}$  ( $\text{RE}=\text{Tm}, \text{Tb}$ ) nanocrystalline phosphors via a sol-gel process. *J Phys Chem C*, 2009, 113: 8478–8483
- 21 Blasse G, Grabmaier B C. *Luminescence Materials*. Berlin: Springer-Verlag Telos, 1994. 84–86
- 22 Flesch P. *Light and Light Sources: High-Intensity Discharge Lamps*. Berlin, New York: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006. Chapter 1