

文章编号: 0253-2239(2005)09-1243-6

# 原材料 $Y_2O_3$ 的结晶性对 $Y_2O_2S:Eu^{3+}$ 发光特性的影响\*

袁剑辉<sup>1,2</sup> 张振华<sup>1</sup> 王晓君<sup>3</sup> 程玉民<sup>2</sup>

1 长沙理工大学物理与电子科学系, 长沙 410076  
2 上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072  
3 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态物理重点实验室, 长春 130033

**摘要:** 为进一步提高  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  的发光性能, 采用改善主要原材料  $Y_2O_3$  结晶性的方法, 使  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  红色荧光粉在 20 kV 和 25 kV 下发光强度分别增强 5% 和 10%, 且不影响色度、粒度、粉体分散性等主要考核指标。提高了粉体的耐电压特性(发射强度与激发电压间的关系特性)。讨论和分析了发射强度增强、电压特性改善的原因: 主要原材料  $Y_2O_3$  的结晶性的改善, 使得合成的  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  具有更好的晶体质量,  $Eu^{3+}$  离子晶场环境得到进一步改善, 从而减弱了无辐射过程及因晶格畸变所造成的能量损失, 发光效率得到增强, 电压特性得到改善。实验表明, 获取高质量多晶  $Y_2O_3$  的最佳分解温度为 1400 °C 左右。

**关键词:** 光学材料;  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  荧光粉;  $Y_2O_3$  结晶性; 发光强度; 耐压性

中图分类号: O482.31 文献标识码: A

## Effects of Crystallinity of Raw Material $Y_2O_3$ on Luminescent Character of $Y_2O_2S:Eu^{3+}$

Yuan Jianhui<sup>1,2</sup> Zhang Zhenhua<sup>1</sup> Wang Xiaojun<sup>3</sup> Cheng Yumin<sup>2</sup>

1 Department of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410077  
2 Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072  
3 Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033

**Abstract:** In order to improve the luminescent character of  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$ , the method of improving crystallinity of primary raw material  $Y_2O_3$  is used. The emission intensity of red phosphors  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  is effectively enhanced 5% and 10% respectively at the voltages of 20 kV and 25 kV while the other primary properties of application in chromaticity, granularity and decentralization are not changed. The voltage resistance character (relation between emission intensity and excitation voltage) is elevated. The origins of the emission intensity enhancement and excitation voltage elevation are discussed and analyzed preliminarily. It is likely that the abnormal change and defect of crystal lattice led by the substitution of larger radius  $Eu^{3+}$  ion for smaller radius  $Y^{3+}$  ion are reduced by the better crystal quality of  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  from the better crystallinity of raw material  $Y_2O_3$ . Because the crystal field condition of  $Eu^{3+}$  ion is improved, radiationless process and energy loss led by crystal defect are cut down, the emission efficiency of  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  phosphors is enhanced and its voltage character is improved. The experiment shows that the decomposing temperature to get the high crystallinity  $Y_2O_3$  is about 1400 °C.

**Key words:** optical materials;  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  phosphors; crystallinity of  $Y_2O_3$ ; emission intensity; voltage resistance character

\* 国家自然科学基金(50172046)和湖南省自然科学基金(03JJY3013)资助课题。

作者简介: 袁剑辉(1962~), 男, 湖南南县人, 长沙理工大学副教授, 博士研究生, 主要从事固体发光材料及固体力学等领域的工作。E-mail: yuanjianhui2003@163.com

收稿日期: 2004-09-27; 收到修改稿日期: 2004-12-20

## 1 引 言

三价铕激活的硫氧钇( $Y_2O_3S:Eu^{3+}$ )是目前广泛应用于显示的重要的红色荧光材料。由于采用较高的激活剂  $Eu^{3+}$  浓度,在阴极射线激发下,产生交叉弛豫,导致  $Eu^{3+}$  离子较高能级发射(蓝和绿)的猝灭,从而得到较纯正鲜红的发光颜色和高的发光强度,而且稳定,已得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>。然而,这种发光材料的电压特性(即电压的增加与发光亮度的关系)尚不能达到要求。近年来,随着计算机的普及和发展,作为终端用的彩色显示器,要求比彩色显像管具有更高的清晰度、对比度和亮度。这些有力地促进了阴极射线管(cathode ray tube, CRT)用发光材料的研究和发展,并在近几年内取得重大进展<sup>[3]</sup>。

目前  $Y_2O_3$  生产厂家大多采用草酸铕分解方法获取高纯度  $Y_2O_3$ 。其分解温度一般为  $920\text{ }^\circ\text{C}$ ,低于  $Y_2O_3S:Eu$  合成温度  $1150\text{ }^\circ\text{C}$ 。低温分解有利于节省生产成本,但分解的  $Y_2O_3$  作为原材料生产的  $Y_2O_3S:Eu$ ,其发光效率及耐电压特性受到限制。我们考虑对草酸铕高于  $1150\text{ }^\circ\text{C}$  进行分解,由在  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1400\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  分解得到的  $Y_2O_3$  合成  $Y_2O_3S:Eu$ ,发现其发光效率在一定条件下能得到较大的提高,同时也明显改善了电压特性。

发光效率一般依赖于合成荧光粉多晶的结晶程度,而合成温度是影响结晶的一个重要因素。考虑  $Y_2O_3S:Eu$  的抗氧化及生产成本等因素,其合成温度无法提高。 $Y_2O_3$  是  $Y_2O_3S:Eu$  主要原材料,一般荧光粉生产厂家主要控制它的杂质含量,尚未考虑其结晶性。本文通过改变  $Y_2O_3S:Eu^{3+}$  红色荧光粉的原料

$Y_2O_3$  结晶性,对现行生产的  $Y_2O_3S:Eu^{3+}$  红色荧光粉在亮度、色度、粒度及电压特性等方面影响进行研究。实验发现,进一步提高  $Y_2O_3$  的结晶性,对提高红色荧光粉  $Y_2O_3S:Eu$  发光性能显得非常必要。

## 2 实 验

按一般稀土提纯办法制备草酸铕<sup>[4,5]</sup>,分别在  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1400\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  氧化环境下高温分解  $1\sim 3\text{ h}$  得到不同结晶性的  $Y_2O_3$ 。

按化学配比精确称取一定量的  $Eu_2O_3$ , S, 不同结晶性的  $Y_2O_3$  及助熔剂  $Na_2CO_3$ , 在玛瑙研钵混和、磨均、装入刚玉坩埚,在 S 保护气氛下于  $1150\text{ }^\circ\text{C}$  高温灼烧  $2\text{ h}$ , 烧结物通过水渍、洗涤、过滤和干燥,即得到洁白的细粒径粉末样品<sup>[6~10]</sup>。

样品的亮度、色度及阴极射线发射光谱,采用压片法,用日本的 EA-565A 型 CR 测试装置,在  $20\text{ kV}$ ,  $1\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$  条件下测试;以 Cu 靶的  $K_\alpha$  为辐射源,使用日本理学 D/max-rA 型转靶 X 射线衍射仪检测样品的晶体结构;使用 Cambridge-250 扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)观测及拍摄晶粒形貌。将荧光粉搅入 NaCl 溶液,超声振动  $5\text{ min}$  后,按库尔特计数法(Coulter-counter method),用日本 TA-2 型粒度测试仪测试样品的粒度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 晶粒和形貌

图 1(a)~图 1(d)分别为草酸铕在  $920\text{ }^\circ\text{C}$ 、

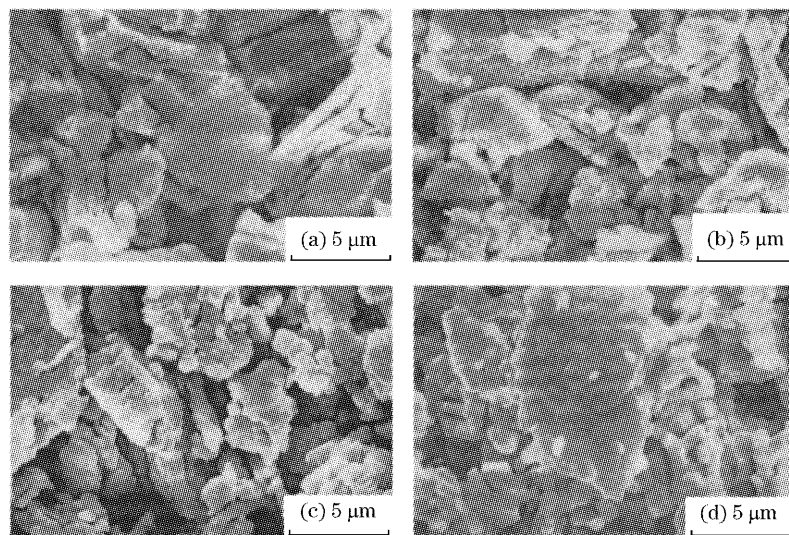


图 1 不同分解温度获得的  $Y_2O_3$  粉末的扫描电子显微镜照片

Fig. 1 SEM micrographs of  $Y_2O_3$  powder with different decomposing temperature

1300 °C、1400 °C、1500 °C 下氧化分解 1 h 后得到的  $Y_2O_3$  的 SEM 照片。这些  $Y_2O_3$  颗粒随温度增加，分子键被活化，晶粒趋于球形，粒子近乎均匀分布，结晶形态得到明显改善。但当分解温度达 1500 °C 时，部份分子键获取的能量超过极限值，出现断裂，分子流动性增强，晶粒界面表现为趋熔状态，晶粒间开始产生结团现象，材料结晶质量反而会受到影响。

图 2(a)~图 2(d) 为不同分解温度得到的  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  的 SEM 照片，分别与图 1(a)~图 1(d) 对应。当分解温度达到 1400 °C 时，所制备的  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$ ，晶界清晰，晶粒大小更趋均匀，粒径分布窄，结团打开，分散性良好，结晶形态达到最佳状态。

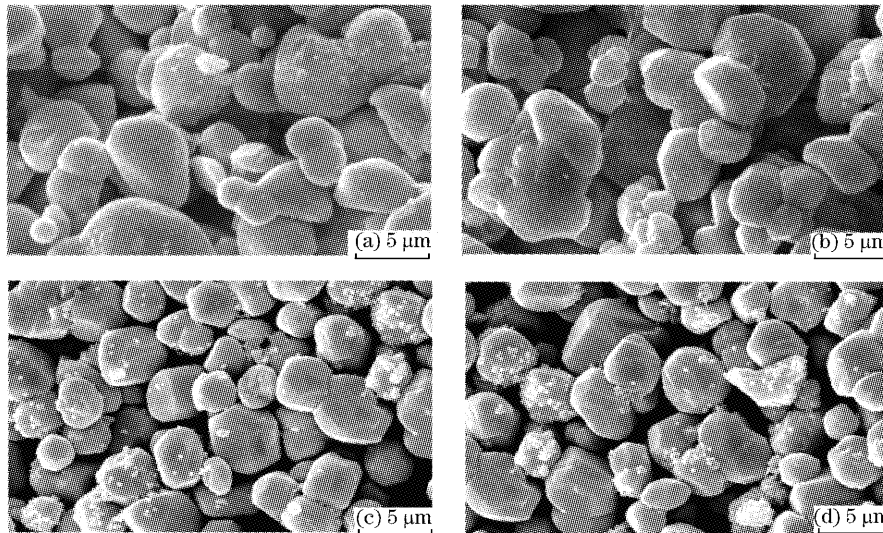


图 2 以不同分解温度获得的  $Y_2O_3$  为原材料合成的  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  的扫描电子显微镜照片

Fig. 2 SEM micrographs of synthesized  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  by  $Y_2O_3$  with different decomposing temperature

### 3.2 结构与粒度分析

图 3 为不同分解温度得到的  $Y_2O_3$  的 X 衍射图

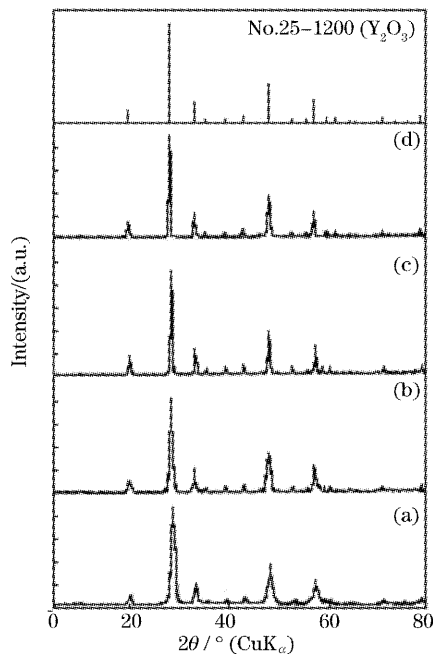


图 3 不同分解温度获得的  $Y_2O_3$  的 X 射线衍射谱

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of  $Y_2O_3$  powder with different decomposing temperature

谱。表 1 为三强峰的半峰全宽数据。X 射线结构分析表明，在 920 °C 及更高温度分解所制得的  $Y_2O_3$  的晶体结构均为立方晶系，没有杂相，与国际晶体衍射卡 No. 25-1200 数据对应得非常好，说明  $Y_2O_3$  具有体心立方结构。进一步观察及分析可发现，1400 °C 以下，随着分解温度的提高，各峰明显趋于强而锐，三强峰半峰全宽逐渐减小，表明结晶性能得到提高，晶粒质量得到改善。1500 °C 图谱强度开始下降但三强峰半峰全宽并不继续减小，表明晶体质量趋于劣化，和上述  $Y_2O_3$  和  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  的 SEM 照片显示的晶粒形貌分析结论基本吻合。

表 1 不同分解温度获得的  $Y_2O_3$  的主要 X 射线衍射峰的半峰全宽

Table 1 The FWHM of the primary peaks in X-ray diffraction patterns of  $Y_2O_3$  powder with different decomposing temperature

FWHM / (°)	(a)	(b)	(c)	(d)
29.121	0.99	0.76	0.48	0.47
48.332	0.86	0.74	0.46	0.48
57.415	0.88	0.65	0.48	0.45

图 4 为不同  $Y_2O_3$  作为原材料合成的  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$

Eu<sup>3+</sup> 粉末 X 衍射图谱。表 2 为各峰半峰全宽数据。与粉末标准衍射卡 NO. 24-1424 六角结构 Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S 体材料的数据符合得相当好, 确定所合成的 Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S :Eu<sup>3+</sup> 晶体均系六角结构, 没有任何杂相存在, 微量 Eu<sup>3+</sup> 对 Y<sup>3+</sup> 的取代并不显著改变原来晶系和晶胞参量。晶体具有 D<sub>3d</sub><sup>3</sup>(P<sub>3m</sub>) 空间群, 晶格常数 a<sub>0</sub> = 0.3785 nm, c<sub>0</sub> = 0.6589 nm, Y<sup>3+</sup> 在晶体中具有 C<sub>3v</sub>

对称操作<sup>[11]</sup>。但采用不同原材料合成的 Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S :Eu<sup>3+</sup> 的结晶质量存在差别, 最佳分解温度以 1400 °C 为宜。Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S :Eu<sup>3+</sup> 的各衍射峰半峰全宽随 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 分解温度变化规律和上述 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 情况相似, 表明主要原材料 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 结晶性能对合成的 Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S :Eu<sup>3+</sup> 晶体质量存在较大影响。

表 2 X 射线衍射峰的半峰全宽及其计算粒径

Table 2 The FWHM of the peaks in X-ray diffraction patterns and the calculated grain sizes

2θ / (°)	hkl	(a)		(b)		(c)		(d)	
		FWHM / (°)	D <sub>hkl</sub> / nm	FWHM / (°)	D <sub>hkl</sub> / nm	FWHM / (°)	D <sub>hkl</sub> / nm	FWHM / (°)	D <sub>hkl</sub> / nm
27.081	100, 002	0.71	11.4	0.61	13.3	0.34	23.8	0.36	22.5
30.409	101	0.94	8.65	0.66	12.3	0.32	25.4	0.33	24.6
38.710	102	0.73	11.4	0.51	16.3	0.36	23.1	0.35	23.8
41.060	003	0.59	14.2	0.52	16.2	0.34	24.7	0.35	24.0
48.018	110	0.71	12.1	0.60	14.4	0.29	29.7	0.31	27.8
49.947	103, 111	0.72	12.1	0.59	14.7	0.36	24.1	0.37	23.5
55.978	112, 200	0.69	12.9	0.50	17.8	0.28	31.8	0.26	34.3
57.920	201	0.61	14.7	0.49	18.3	0.31	29.0	0.30	30.0
63.215	104	0.68	13.6	0.48	19.2	0.23	40.1	0.22	41.9
64.989	113	0.70	13.3	0.51	18.3	0.34	27.4	0.35	26.6

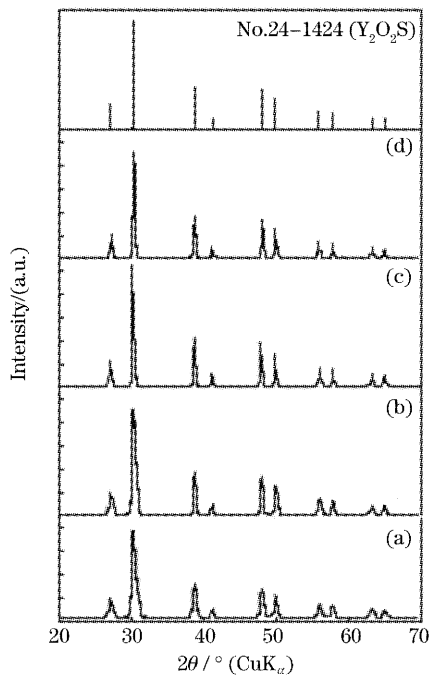


图 4 以不同分解温度获得的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为原材料合成的 Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S :Eu<sup>3+</sup> 的 X 射线衍射谱

Fig. 4 X-ray diffraction patterns of synthesized Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S :Eu<sup>3+</sup> by powder Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with different decomposing temperature

由于晶粒尺寸而引起的 X 射线衍射线宽化, 根据谢乐 (Scherrer) 公式:

$$D_{hkl} = K\lambda / \beta_{hkl} \theta_{hkl}$$

可计算相应晶粒平均尺寸。式中 D<sub>hkl</sub> 是晶体在 [hkl] 晶面方向的平均晶粒尺寸 (10<sup>-10</sup> m), λ 是 X 射线的

波长 (本实验采用 Cu 靶的 K<sub>α</sub> 线, λ 取 1.5406 × 10<sup>-10</sup> m), θ<sub>hkl</sub> 为布拉格衍射角, β<sub>hkl</sub> 为衍射峰 [hkl] 的半峰全宽 (弧度), K 为外形系数, 其值依赖于几个因数, 如反射面的米勒指数、晶体的形状等。如形状未知, K 通常取 0.89。不同 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合成的 Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S :Eu<sup>3+</sup> 各衍射方向晶粒尺寸计算结果如表 2 所示。其值与电镜观察及实测粒径存在较大的差异, 这是由于以下原因影响了谢乐公式计算粒径 D 的准确性: 样品的结晶度情况及晶体内部是否完善结晶, 晶体中不均匀应变等晶体缺陷存在, 都会导致衍射峰宽化, 而此时并不意味着粒度一定减小; 其次, 颗粒是否为单颗粒或多种形式的多颗粒团聚体; 第三, 与所选 [hkl] 晶面有关。晶面重叠也是影响粒径计算准确性的重要原因。随着分解温度的升高, 小粒子因表面积较大, 团聚系数大, 晶体增长较快, 晶粒间更容易形成难于分离的硬团聚; 而大粒子增长缓慢, 其团聚属软团聚, 在超声作用下容易打开, 结果表现为中心粒度略有增长, 但晶粒大小更趋均匀, 粒径分布也变窄, 更有利于发光强度的增强。

### 3.3 发光特性

Eu<sup>3+</sup> 的发光主要来自 <sup>5</sup>D<sub>0</sub> → <sup>7</sup>F<sub>J</sub> (J = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6) 跃迁。其中 <sup>5</sup>D<sub>0</sub> → <sup>7</sup>F<sub>1</sub> 跃迁是磁偶极跃迁, 对环境的变化不灵敏; 而 <sup>5</sup>D<sub>0</sub> → <sup>7</sup>F<sub>0,2,4,6</sub> 为电偶极跃迁, 其跃迁几率与所处的环境有关; <sup>5</sup>D<sub>0</sub> → <sup>7</sup>F<sub>2</sub> 为超灵敏跃迁, 对环境的变化特别敏感。因此 <sup>5</sup>D<sub>0</sub> → <sup>7</sup>F<sub>0,2,4,6</sub>

跃迁强弱可用于指示  $Eu^{3+}$  离子所处的环境变化<sup>[12,13]</sup>。改变主要原材料  $Y_2O_3$  的结晶性,势必影响到  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  晶体的形成,引起  $Eu^{3+}$  离子所处的晶场环境的改变,从而影响到  $^5D_0 \rightarrow ^7F_{0,2,4,6}$  的发射,使  $Eu^{3+}$  离子的发光性质发生变化。图 5 表示通过不同结晶性  $Y_2O_3$  合成的  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  阴极射线发射光谱。从图 5 可看出,最强的发射峰位于 626 nm 处,属  $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$  电偶极跃迁。616 nm 次发射峰也应属  $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$  跃迁,这是由  $^7F_2$  在晶场中劈裂的结果。 $^5D_0 \rightarrow ^7F_4$  跃迁也给出较强的发射,位于 704 nm 处。595 nm, 586 nm 发射峰应属于  $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$  跃迁。 $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$  跃迁应属于  $Eu^{3+}$  磁偶极跃迁。由  $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$  和  $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$  的相对强度比较表明  $Eu^{3+}$  在  $Y_2O_2S$  基质中占据非对称中心位置,使  $Eu^{3+}$  所受的奇晶场成份或奇振动发生相反宇称态的混杂,导致

电偶极跃迁允许,因而表现出  $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$  发射较强。也可理解为电-声子相互作用,造成声子诱导的电偶极跃迁及半径较大的  $Eu^{3+}$  ( $r=0.113$  nm) 取代半径较小的  $Y^{3+}$  ( $r=0.106$  nm), 导致晶格出现微小畸变,格位对称性稍偏离反演对称性的缘故。因荧光粉基本组成未变,光谱结构不发生变化,但各峰相对强度发生变化。由表 3 可看到,随着  $Y_2O_3$  分解温度的提高,  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  发射光谱各主发射峰开始出现增强效应。1300 °C 时, 626 nm, 616 nm, 704 nm 发射峰增强分别为 3.3%, 3.2%, 1.6%, 1400 °C 分别达到 7.4%, 9.0%, 4.9%, 但 1500 °C 则开始转为下降, 分别为 5.0%, 5.7%, 3.3%。

不同结晶性  $Y_2O_3$  对  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  的发光性质影响如表 4 所示。

表 3 不同分解温度获得的原材料  $Y_2O_3$  对  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  的主要发射峰值的影响

Table 3 The effects of  $Y_2O_3$  with different decomposing temperature on the intensity of the main emission peaks of  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$

Transition	Centre wavelength /nm	920 °C	1300 °C	1400 °C	1500 °C
$^5D_0 \rightarrow ^7F_2$	626	100.0	103.3	107.4	105.0
	616	44.3	47.5	53.3	50.0
$^5D_0 \rightarrow ^7F_4$	704	37.7	39.3	42.6	41.0

表 4 不同分解温度获得的原材料  $Y_2O_3$  对  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  的发光性质的影响

Table 4 The effects of  $Y_2O_3$  with different decomposing temperature on the luminescent character of  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$

Temperature / °C	20 kV Relative brightness / %	Chromaticity		25 kV Relative brightness / %	Granularity $d_{50}/\mu m$	Time shift out / s
		$x$	$y$			
920	100	0.6588	0.3355	115	6.2	19
1300	102	0.6591	0.3362	118	6.3	18
1400	105	0.6590	0.3358	125	6.5	17
1500	103	0.6592	0.3363	121	6.6	18

分解温度分别为 920 °C, 1300 °C, 1400 °C 和

1500 °C 对应的样品,其 25 kV 亮度相对 20 kV 亮度增强比例分别是 15.0%, 15.7%, 19.0%, 17.5%。粒度略有增大,但在考核范围以内。反映粉体分散性的过筛时间基本没有变化。可以看出,适当分解温度获得的  $Y_2O_3$  作为原材料合成  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  发光强度增强,且 25 kV 电压激发下的相对亮度明显提高,电压特性得到显著改善,并不影响色度、粒度、粉体分散性等主要考核指标。通过彩色显像(示)管涂屏检测,完全符合现代生产荧光粉质量要求。 $Y_2O_3$  是  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  主要原材料,其结晶性能优劣直接影响到由其合成的  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  晶体质量,高质量的  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  可使因半径较大的激活剂  $Eu^{3+}$  取代半径较小的  $Y^{3+}$  所造成的晶格畸变的得到适当补偿。荧光粉晶格质量的改善,使损失能量的无辐射过程及缺陷减少<sup>[9,10]</sup>,因而  $Eu^{3+}$  发光效率得到提高。晶体质量的改善,使得耐电子轰击能力

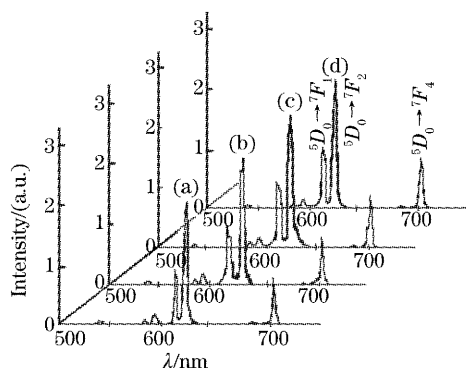


图 5 不同分解温度获得的原材料  $Y_2O_3$  对  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  的阴极射线光谱的影响

Fig. 5 The effects of raw material  $Y_2O_3$  with different decomposing temperature on cathode ray spectra of  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$

得到增强,耐电压特性自然也得到提高。

## 4 结 论

$Y_2O_3$  的结晶性对  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  发光特性产生较大影响。结晶性好的  $Y_2O_3$  合成的  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  可使其发光强度提高,耐电压特性增强,并不影响色度、粒度、粉体分散性等主要考核指标。通过实验表明,获取高质量多晶  $Y_2O_3$  最佳分解温度为  $1400\text{ }^\circ\text{C}$  左右,温度太低,不利于球形颗粒的充分形成,结晶性能不高,温度过高,不利于成本的节约,且  $Y_2O_3$  颗粒结晶质量反而受到影响,合成的荧光粉晶体质量及发光性能均未进一步改善。

## 参 考 文 献

- 1 Jeannette Dexpett-Ghys, Yves Charreire, Marktu Leskela *et al.*. Transient Properties of the Luminescence of  $Eu^{3+}$  and  $Tb^{3+}$  in oxysulfide matrices [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1985, **132**: 711~715
- 2 Chi Yuanbin, Liu Shenxin, Wang Lizhong *et al.*. Emission spectra, energy levels and crystal field for  $Eu^{3+}:Gd_2O_2S$  under high pressure [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(1): 1~7 (in Chinese)  
池元斌,刘慎薪,王立中等. 高压下  $Eu^{3+}:Gd_2O_2S$  的发射光谱、能级及晶体场[J]. *光学学报*, 1995, **15**(1): 1~7
- 3 Gao Wei, Gu Hongchen. Market, production and investigation of  $Y_2O_2S:Eu$  red-emitting phosphor for cathode ray tubes [J]. *Chinese Rare Earths*, 1998, **19**(4): 66~69 (in Chinese)  
高 玮,古宏晨. 阴极射线管用  $Y_2O_2S:Eu$  红粉的市场、生产和研究[J]. *稀土*, 1998, **19**(4): 66~69
- 4 Wu Jianhui, Zhang Zhuanfu, Wu Linlin *et al.*. Precipitation oxalate method and its application in preparing powder materials [J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2001, (3): 13~16 (in Chinese)  
邬建辉,张传福,吴琳琳等. 草酸盐沉淀法在制备粉体材料中的应用[J]. *四川有色金属*, 2001, (3): 13~16
- 5 Yuan Jianhui, Yuan Honghui, Zhang Xia *et al.*. A study on anti-ageing of  $Y_3(Al, Ga)_5O_{12}:Tb$  green phosphor material for projection television[J]. *J. The Chinese Ceramic Society*, 2004, **32**(5): 576~579 (in Chinese)  
袁剑辉,袁红辉,张 霞等. 投影电视绿粉  $Y_3(Al, Ga)_5O_{12}:Tb$  的抗老化研究[J]. *硅酸盐学报*, 2004, **32**(5): 576~579
- 6 Myung Han Lee, Seong Geun Oh, Sung Chul Yi *et al.*. Characterization of Eu doped  $Y_2O_3$  nanoparticles prepared in nonionic reverse micro emulsions in relation to their application for field emission display[J]. *J. Electrochem Soc.*, 2000, **147**(8): 3139~3142
- 7 Zeng Lihua, Liu Limin, Zhu Xiaojuan *et al.*. Synthesis and spectra characteristics of  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  red phosphors [J]. *J. Hunan Medical College*, 1999, **1**(1): 3~4 (in Chinese)  
曾立华,刘利民,朱小娟等.  $Y_2O_2S:Eu^{3+}$  红色荧光粉的合成与光谱性质[J]. *湖南医学高等专科学校学报*, 1999, **1**(1): 3~4
- 8 Yuan Jianhui, Liu Xingren, Lin Hai *et al.*. Fluorescence of  $Eu^{3+}$  ion in silicate glass [J]. *Chinese J. Luminescence*, 1998, **19**(1): 92~94 (in Chinese)  
袁剑辉,刘行仁,林 海等. 镉铝硅酸盐玻璃中  $Eu^{3+}$  离子的荧光[J]. *发光学报*, 1998, **19**(1): 92~94
- 9 Xiao Zhang, Jianhui Yuan, Xingren Liu *et al.*. Tree-photon upconversion in  $Er^{3+}$  doped  $Ca_3Al_2Ge_3O_{12}$  [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, **273**: 416~420
- 10 Yuan Jianhui, Liu Xingren. Spectroscopic characteristics of  $Ce^{3+}$  doped  $Ca_3Al_2M_3O_{12}$  ( $M=Si, Ge$ ) garnets [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1998, **18**(1): 11~14 (in Chinese)  
袁剑辉,刘行仁.  $Ca_3Al_2M_3O_{12}$  ( $M=Si, Ge$ ) 石榴石中  $Ce^{3+}$  离子的荧光[J]. *光谱学与光谱分析*, 1998, **18**(1): 11~14
- 11 Chunglun Lo, Jenqgong Duh, Bishiou Chiou *et al.*. Synthesis of  $Eu^{3+}$ -activated yttrium oxysulfide red phosphor by flux fusion method [J]. *Material Chemistry and Physics*, 2001, **71**: 179~189
- 12 Chen Baojiu, Wang Haiyu, Huang Shihua. A study on borate-lead glasses with  $Eu^{3+}$  ion as probe [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 762~765 (in Chinese)  
陈宝玖,王海宇,黄世华. 用  $Eu^{3+}$  作探针研究硼铅玻璃材料 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 762~765
- 13 Lu Shaozhe, Li Dan, Huang Shihua. Energy transfer between  $Eu^{3+}$  ions at different crystallographic sites of  $Y_2O_3$  nanocrystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1084~1087 (in Chinese)  
吕少哲,李 丹,黄世华.  $Y_2O_3$  纳米晶中两种格位的  $Eu^{3+}$  之间的能量传递 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1084~1087