

# Progress of Research on Luminescence Mechanism of Red Luminescent Materials

Yuyu He<sup>1\*</sup>, Yan Chen<sup>2</sup>, Rui Chen<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>College of Chemistry and Chemical Engineering, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Yunnan Hongcheng Zhuoyue Construction Engineering Co. Ltd., Kunming Yunnan

Email: <sup>#</sup>rui\_chen888@163.com

Received: Oct. 13<sup>th</sup>, 2016; accepted: Oct. 31<sup>st</sup>, 2016; published: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The red luminescent materials can absorb energy and transform the energy into optical radiation. The luminescence mechanisms of red luminescent materials including red fluorescent powder, red long persistence phosphor, rare earth electroluminescent material and nano rare earth luminescence material were reviewed. Finally, the future research aspects of red luminescent material were discussed in this paper.

## Keywords

Luminescent Material, Luminescence Mechanism, Fluorescent Powder, Activator

---

## 红色发光材料发光机理的研究进展

何宇雨<sup>1\*</sup>, 陈燕<sup>2</sup>, 陈芮<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>云南师范大学化学化工学院, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南宏程卓越建设工程技术有限公司, 云南 昆明

Email: <sup>#</sup>rui\_chen888@163.com

收稿日期: 2016年10月13日; 录用日期: 2016年10月31日; 发布日期: 2016年11月3日

---

\*第一作者。

<sup>#</sup>通讯作者。

## 摘要

红色发光材料是一类通过吸收能量,将其转化为光辐射的发光材料。本文综述了红色荧光粉、红色长余辉光致磷光体、稀土电致发光材料及稀土纳米发光材料的发光机理;对红色发光材料的研究前景进行了展望。

## 关键词

发光材料, 发光机理, 荧光粉, 激活剂

## 1. 引言

发光材料由基质和激活剂组成[1]。其中,基质是主体化合物;激活剂是发光中心的掺杂离子。化学表示式:MR:A。MR:基质;A:激活剂。

红色发光材料被广泛用于显示及照明领域。在现实中寻求发光亮度高,性能稳定的红色发光材料一直是研究的热点。如白光发光二极管(LED)作为新型固体光源,具有节能、高效、环保等优点,实现白光LED的荧光转换技术,因缺少红光,存在显色指数低、色温高等问题,因此寻求能被近紫外光有效激发、发光性能稳定的红色发光材料已成为研究的关键点。本文根据发光机理,将红色发光材料分为红色荧光粉、红色长余辉光致磷光体、稀土电致发光材料及稀土纳米发光材料等4类,分析了这些材料发光机理的研究现状,并对红色发光材料今后的发展前景进行了展望。本文尝试以发光机理为切入点为研究者提供改进红色发光材料发光性能的新的思路和途径。

## 2. 红色发光材料

### 2.1. 红色荧光粉

荧光:激发时发光。红色荧光粉,如 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$ 、 $\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 等主要用于阴极射线管中。 $\text{Eu}^{3+}$ 存在能级跃迁[2],即 $\text{Eu}^{3+}$ 受到激发后跃迁到 $^5\text{D}_j$ ,再从 $^5\text{D}_j$ 跃迁回低能级而辐射产生荧光。 $\text{Eu}^{3+}$ 的 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ 磁偶极跃迁产生橙色的荧光; $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ 电偶极跃迁产生红色的荧光。

$\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 荧光粉具有良好的温度猝灭性能和电流饱和特性,被广泛用于高分辨率彩色投影电视机和荧光灯中[3]。 $\text{Ce}^{3+}$ 对 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 荧光粉的发光强度有显著的影响[4]。随着 $\text{Ce}^{3+}$ 浓度的增加, $\text{Eu}^{3+}$ 在614 nm和587 nm发射峰的强度显著增强。由于 $\text{Ce}^{3+}$ 的 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ 发射带与 $\text{Eu}^{3+}$ 的 $^7\text{F}_1 \rightarrow ^5\text{D}_0$ 发射带有重叠,会产生共振能量传递,从而提高发光强度。

在 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$ 荧光粉中, $\text{Eu}^{3+}$ 的发射峰在626 nm,对应于 $\text{Eu}^{3+}$ 的 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ 跃迁发射[5]。若 $\text{Eu}^{3+}$ 的浓度较高,会使 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$ 产生交叉弛豫,导致 $\text{Eu}^{3+}$ 的较高能级的蓝光发射发生猝灭,呈现较鲜红的颜色和较高的发光强度。

掺杂 $\text{Sm}^{3+}$ 和 $\text{Gd}^{3+}$ 可以改变 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$ 的发光特性[6]。 $\text{Sm}^{3+}$ 的发射带与 $\text{Eu}^{3+}$ 的吸收带基本重叠,并且在 $\text{Eu}^{3+}$ 的激发光谱中,包含 $\text{Sm}^{3+}$ 的激发跃迁谱线,从而使 $\text{Sm}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$ 可能发生共振能量传递,实现 $\text{Sm}^{3+}$ 对 $\text{Eu}^{3+}$ 的敏化效应。 $\text{Gd}^{3+}$ 对 $\text{Y}^{3+}$ 的置换能够减少 $\text{Eu}^{3+}$ 对 $\text{Y}^{3+}$ 的置换所产生的晶格畸变。 $\text{Eu}^{3+}$ 的晶体场发生变化能减弱无辐射过程,削弱由晶格畸变产生的能量损失。

$\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$ 作为两种高效红色荧光粉,由于 $\text{Eu}^{3+}$ 的窄带发射,能使彩色电视红粉亮度提

高, 使图像亮度提高 1 倍以上, 改善亮度 - 电流饱和特性。

与  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$  和  $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$  相比,  $\text{YVO}_4$  基质能增强  $\text{Eu}^{3+}$  的 f-f 红色发射跃迁, 提高发光效率。其发光机理为  $\text{Y}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ,  $\text{Eu}^{3+}-\text{O}^{2-}$  和  $\text{VO}_4^{3-}$  吸收的大部分能量先在亚晶格之间传递, 再传递给  $\text{Eu}^{3+}$  [7]。外界激发源在  $\text{YVO}_4$  上把能量传递给激活离子的规律如下:

(1) 基质在紫外区(281 nm)吸收能量;

(2) 少部分能量通过在  $\text{V}^{5+}\text{O}^{-2n}$  与  $\text{V}^{4+}\text{O}^{-2n+1}$  之间的跃迁而发光;

(3) 大部分能量先无辐射跃迁到  $\text{Eu}^{3+}$  的较高能级, 再跃迁到  $^5\text{D}_1$  能级, 在此能级上有少部分能量跃迁到基态发光; 大部分能量衰减到  $^5\text{D}_0$  能级, 发出明亮的红光。

$\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Bi}^{3+}$  荧光粉的特征发射峰来自于  $\text{Eu}^{3+}$  的  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$  跃迁。掺杂  $\text{Bi}^{3+}$  不仅能改变激发峰位, 使激发带有一定程度的展宽; 而且  $\text{Bi}^{3+}$  对  $\text{Eu}^{3+}$  具有敏化作用, 适量的  $\text{Bi}^{3+}$  能增强荧光粉的发光强度[8]。

$\text{CaMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$  红色荧光粉[9]在 220 nm~350 nm 范围内的能量吸收带由  $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Mo}^{6+}$  及  $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$  的 P 电子迁移带吸收光谱叠加而成。基质中  $\text{Ca}^{2+}$  产生的势场有利于基质电荷迁移和  $\text{Eu}^{3+}$  的 f-f 跃迁对能量的吸收。 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$  的发射强度随  $\text{Eu}^{3+}$  所处环境发生变化。 $\text{Eu}^{3+}$  和  $\text{Sm}^{3+}$  在近紫外区(400 nm)具有很强的吸收能力, 因此,  $\text{Eu}^{3+}$  和  $\text{Sm}^{3+}$  共掺到  $\text{CaMoO}_4$  中可以增强近紫外区的吸收[10]。

在  $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7:\text{Eu}^{3+}$  中,  $\text{Eu}^{3+}$  主要发生  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$  的电偶极跃迁。在紫外光激发下可观察到四组线状峰, 分别对应于  $\text{Eu}^{2+}$  的  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ 、 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ 、 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_3$  和  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$  等特征跃迁。 $\text{Eu}^{3+}$  离子浓度增加, 发光强度增强。当  $\text{Eu}^{3+}$  浓度增大至 5% 时, 出现浓度猝灭, 其机理: 电偶极 - 电四极相互作用[11]。加入  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  等电荷补偿剂能够提高发光强度。

近几年, 许多 LED 用新型荧光粉被陆续报道[12] [13]。Hu Y. 等采用固相反应在 CO 高温气氛中制备出  $(\text{Ca}_{1-x}, \text{Sr}_x)\text{S}:\text{Eu}^{2+}$  [12]。在 430 nm~490 nm 左右激发该荧光粉时, 发射宽带的红光, 通过调整 Sr 和 Ca 的比例, 能改变发光波长的范围, 提高发射效率。由于其化学性质不稳定, 通过包裹  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等方法, 可以提高化学稳定性。

综上,  $\text{Eu}^{3+}$  的  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$  跃迁发射处于红光区域, 可以弥补白光发射中红光缺失产生的影响。因为  $\text{Eu}^{3+}$  的  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$  跃迁是磁偶极跃迁;  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$  跃迁是电偶极跃迁, 可以通过比较这两种跃迁的发射强度, 判断  $\text{Eu}^{3+}$  在基质晶格中所处的格位。由于  $\text{Eu}^{3+}$  能被紫外光有效激发,  $\text{Eu}^{3+}$  与  $\text{O}^{2-}$  能形成位于紫外光区(250 nm) 的 O-Eu 电荷迁移带, 因此掺入  $\text{Eu}^{3+}$  可提高发光效率[14]。

## 2.2. 红色长余辉光致磷光体

磷光: 激发停止后仍能持续一段时间的发光。红色长余辉光致磷光体是长余辉材料研究的一个薄弱环节, 开发亮度高、性能稳定的红色长余辉磷光体一直是人们研究的瓶颈。目前, 红色长余辉磷光体的研究主要围绕硫化物、钛酸盐、硅酸盐、金属氧化物、磷酸盐和铝酸盐等体系展开。

### 2.2.1. 硫化物体系

在硫化物体系中, 由于  $\text{CaS}:\text{Eu}^{2+}$  发光性能不佳, 可通过改变激活剂, 引入新的陷阱来延长余辉时间[15]。掺杂  $\text{Tm}^{3+}$  可以延长余辉时间, 原因在于引入新的陷阱能级后, 改变了电子空穴转移机制, 使空穴浓度, 跃迁速度减缓[16]。 $\text{Dy}^{3+}$  和  $\text{Er}^{3+}$  具有复杂的电子能级结构,  $\text{Dy}^{3+}$  和  $\text{Er}^{3+}$  共掺能够改善能量传递, 使发光亮度提高、余辉时间延长。

### 2.2.2. 钛酸盐体系

在钛酸盐体系中, Diallo P. T. 等[17]首次报道  $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  具有红色长余辉发光特性。 $\text{MTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  体系属于钙钛矿结构, 发射峰为在 614 nm 有最大峰的锐线谱, 对应于  $\text{Pr}^{3+}$  的  $^1\text{D}^2 \rightarrow ^3\text{H}^4$  特征发射, 为三价稀

土离子典型的  $4f \rightarrow 5d$  能级跃迁发射[18]。

$\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 具有良好的耐候性、化学及热稳定性,由于其余辉时间较短,沈雷军等采用掺入 Zn 的方法来改善其发光性能[19]。研究表明:在生成的  $\text{CaTiO}_3$  和  $\text{Zn}_2\text{TiO}_4$  基质中, Ca 和 Zn 与 O、Ti 之间都能形成 X(Ca、Zn)-O-Ti 离子共价键对,由于 Zn 的电负性(1.65)比 Ca 的电负性(1.00)大,使得 Zn-O-Ti 中 O-Ti 之间键能降低,  $\text{O}(2p) \rightarrow \text{Ti}(3d)$  带间跃迁较为容易,在较低能量区域(324 nm)产生较强的吸收。

### 2.2.3. 硅酸盐体系

硅酸盐体系具有化学稳定性好、易传递能量、原材料来源广泛等特点,但对其的研究较为缓慢。Wang X. J. [20] [21]等报道了  $\text{MgSiO}_3:\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  的发射峰值位于 660 nm,  $\text{Mn}^{2+}$  作为红色发光中心,双掺  $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  可能加深样品的陷阱能级,延长余辉时间。

$\text{CdSiO}_3:\text{Sm}^{3+}$  的发射光谱[22]是由一个峰值为 400 nm 的宽带发射峰和三个分别位于 566 nm、603 nm 和 650 nm 的锐线发射峰构成。前者是  $\text{CdSiO}_3$  的自激活发光;后者是  $\text{Sm}^{3+}$  的特征跃迁发射,对应于  ${}^4\text{G}_{2/5} \rightarrow {}^6\text{H}_{5/2}$ ,  ${}^4\text{G}_{2/5} \rightarrow {}^6\text{H}_{5/2}$  和  ${}^4\text{G}_{2/5} \rightarrow {}^6\text{H}_{9/2}$  能级跃迁。

$\text{CdSiO}_3:\text{Mn}^{2+}$  [23] 宽带发射的最大发射峰位于 575 nm,对应于  $\text{Mn}^{2+}$  的  ${}^4\text{T}_{1g}(\text{G}) \rightarrow {}^6\text{A}_{1g}(\text{S})$  跃迁。由于  $\text{Cd}^{3+}$  对  $\text{Mn}^{2+}$  的能量传递,导致  $\text{CdSiO}_3:\text{Mn}^{2+}$  磷光体在 254 nm 处产生生长余辉现象。

对  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}$ ,  $\text{Dy}$  发光机理[24]的研究表明:在光源照射时,  $\text{Eu}^{2+}$  由基态跃迁到激发态,再弛豫到亚稳态( $\text{Eu}^{1*}$ )。  $\text{Eu}^{2+}$  激发时所释放的空穴被陷阱中心  $\text{Dy}^{3+}$  捕获,使其转化成  $\text{Dy}^{4+}$ 。

$\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  在红色发光区有一较宽的发射带,最大发射峰位于 650 nm,对应于  $\text{Mn}^{2+}$  的  ${}^4\text{T}_1({}^4\text{G}) \rightarrow {}^6\text{A}_1({}^6\text{S})$  跃迁[25]。

### 2.2.4. 金属氧化物体系

金属氧化物  $\text{MO}:\text{Eu}^{3+}$  ( $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ ) [26] 作为一种新型的红色磷光体,发射光谱峰值位于 594 nm 和 616 nm,分别对应于  $\text{Eu}^{3+}$  的  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$  和  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$  跃迁发射。

### 2.2.5. 磷酸盐体系

$\beta\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Mn}^{2+}$  是一类磷酸盐体系的红色长余辉磷光体[27],发射光谱为一宽带峰,峰值位于 616 nm,是  $\text{Mn}^{2+}$  占据一个六配位的  $\text{Zn}^{2+}$  格位时所产生的  ${}^4\text{T}_{1g}({}^4\text{G}) \rightarrow {}^6\text{A}_{1g}({}^6\text{S})$  跃迁。掺入过量的  $\text{Zn}^{2+}$  能够在晶格中产生大量缺陷中心,进而产生合适深度的陷阱能级。在该体系中共掺杂  $\text{M}^{3+}$  ( $\text{M}$  为 Al 或 Ga),能在一定程度上降低发光亮度,但是能够提高余辉亮度和时间。

### 2.2.6. 铝酸盐体系

铝酸盐红色长余辉磷光体如  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ , 发射峰最大值位于 582 nm,对应于  $\text{Eu}^{2+}$  的  $4f^65d \rightarrow 4f^7$  的跃迁[28]。

## 2.3. 稀土电致发光材料

### 2.3.1. 无机电致发光材料

无机电致发光材料以其全固体化的平板显示、主动发光和使用温度范围宽等优势,在科学仪器、航空航天和军事等领域中都表现出更广的应用前景[29]。

无机电致发光材料必须通过掺杂才能实现发光;特征光谱由发光中心的性质决定。发光中心能够直接进行激发,即基质先吸收能量,再将能量传递给发光中心。

以 ZnS 为基质的电致发光材料余辉时间较短,在光照和潮湿空气中容易变质,所以在许多领域中,其应用受到限制。掺杂  $\text{NdF}_3$ 、 $\text{SmF}_3$  和  $\text{EuF}_3$  发射红光,但  $\text{ZnS}:\text{Sm}^{3+}$  和  $\text{ZnS}:\text{Tm}^{3+}$  的亮度仍不能满足实际应

用的要求。

### 2.3.2. 有机金属配合物红色发光材料

已报道的红光配合物材料包括 Eu、Pt、Ir、Ru 和 Os 等 5 类[30] [31]。Eu 作为重要的发光稀土元素之一，其配合物具有以下发光特性：

(1) 发射峰很窄(约 4 nm)，波长在 617 nm 左右，发射光谱几乎是线谱，满足有机电致发光器件(OLED)对色纯度(窄峰)的严格要求；

(2) 中心离子发光，主要是  $\text{Eu}^{3+}$  的  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$  的特征发射，其轨道跃迁不受配体能级的影响；

(3) 有机配体激发单重态经过隙间穿越到激发三重态，将能量传递给  $\text{Eu}^{3+}$ ，其间  $\text{Eu}^{3+}$  的 4f 电子受到激发，回到基态时辐射出相应的光。

卟啉及金属卟啉配合物是有机电致发光红色染料中的重要组成部分[32]，其荧光发射位于红光区域(590 nm~650 nm)。当卟啉化合物与金属配位后，它的发射峰消减，半峰宽在 60 nm 左右，具有红色饱和和发光。

吡啶卟啉衍生物(DADIN)是红色掺杂型电致发光材料吡喃卟啉衍生物(DCJT B)的替代品，如图 1。由于 DADIN 中引入了吡啶单元，增强了电子亲核势，提高了电子与空穴复合发光的几率，从而提高了 DADIN 的电流效率[33] [34]。

### 2.4. 稀土纳米发光材料

与体相材料相比，稀土发光材料纳米化后会出现电荷迁移态红移、发射峰谱线宽化、猝灭浓度升高等现象。这些现象使稀土纳米发光材料成为研究热点，但目前仍处于基础研究阶段。

稀土离子到发光猝灭中心的能量传递过程受粒子尺寸作用和表面态的影响[35]。界面及表面效应能使发光粒子所处的晶体场发生变化，能级发生跃迁或带隙变窄，产生红移。

## 3. 展望

$\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$  等将成为红色发光材料的主流产品，其中以硫氧化物系列的性能最为优良。从保护生态环境、爱护自然资源方面讲，选择能有效地存储和传递能量的掺杂剂、共掺杂剂，制备出化学稳定性好、发光特性优良的红色长余辉发光体将成为红色发光材料研究的重要方向。

以  $\text{Eu}^{3+}$  为配合物的有机金属发光材料发光效率较高，色纯度较好，已引起重视。

稀土纳米发光材料具有良好的应用前景，利用纳米稀土氧化物制作细颗粒的荧光粉将成为稀土纳米发光材料研究的方向。

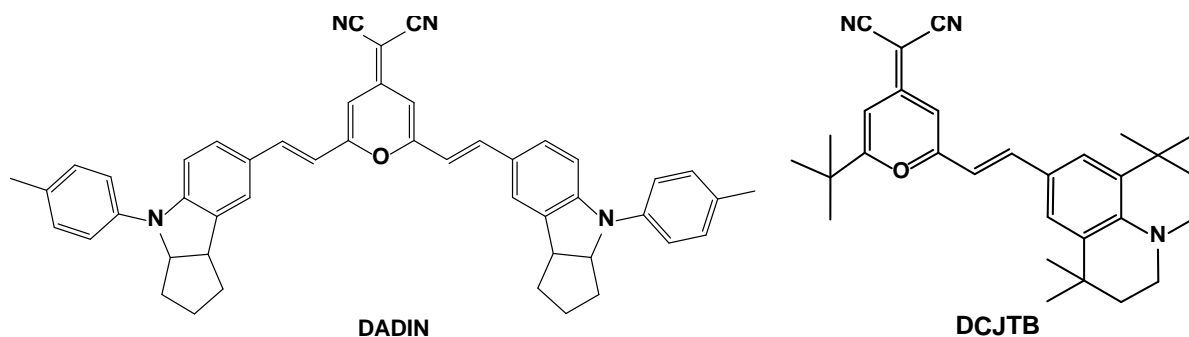


Figure 1. The chemical structures of DADIN and DCJT B

图 1. DADIN 和 DCJT B 的化学结构式

## 基金项目

云南省教育厅(2015Y103)资助项目。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘光华. 稀土材料学[M]. 2007年版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 194-224.
- [2] 李梅. 稀土元素及其分析化学[M]. 2009年版. 北京: 化学工业出版社, 2009: 70-73.
- [3] Kang, Y.C., Roh, H.S. and Park, S.B. (2000) Preparation of  $\text{Y}_2\text{O}_3$ : Eu Phosphor Particles of Filled Morphology at High Precursor Concentrations by Spray Pyrolysis. *Cheminform*, **12**: 451-453.
- [4] 占世平, 高永毅.  $\text{Ce}^{3+}$ 共掺杂对  $\text{Y}_2\text{O}_3$ : $\text{Eu}^{3+}$  荧光粉的发光性能和颗粒形貌的影响[J]. 材料开发与应用, 2011, 269(5): 15-18.
- [5] Yamamoto, H., Otomo, Y. and Kano, T. (1996) Satellite Lines Due to Ion-Pairs in the Luminescence Spectra of  $\text{Y}_2\text{O}_3$ : $\text{Eu}^{3+}$ . *Journal of the Physical Society of Japan*, **26**, 137-142. <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.26.137>
- [6] 袁剑辉, 袁红辉, 张振华, 程玉民, 王晓君. 痕量双掺  $\text{Sm}^{3+}$ 和  $\text{Gd}^{3+}$ 对  $\text{Y}_2\text{O}_3$ : $\text{Eu}^{3+}$ 发光特性的影响[J]. 中国稀土学报, 2005, 23(4): 421-424.
- [7] 赵金秋, 夏志国, 余静, 包婷婷. 低温熔盐合成  $\text{YVO}_4$ : $\text{Eu}^{3+}$ 红色荧光粉及其发光性能研究[J]. 化工新型材料, 2011, 39(3): 39-41.
- [8] Xia, Z., Chen, D., Yang, M., *et al.* (2010) Synthesis and Luminescence Properties of  $\text{YVO}_4$ : $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Bi}^{3+}$  Phosphor with Enhanced Photoluminescence by  $\text{Bi}^{3+}$  Doping. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **71**, 175-180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpics.2009.10.016>
- [9] 高飞, 卢滔, 陈翔.  $\text{CaMoO}_4$ : $\text{Eu}^{3+}$ 红色荧光粉的制备及光谱分析[J]. 广州化工, 2013, 41(13): 91-93.
- [10] 耿秀娟, 田彦文, 陈永杰, 肖林久. 白光 LED 用钨/钼酸盐红色荧光粉的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(7): 54-57.
- [11] 杨志平, 马欣, 王凤和, 等. 红色荧光粉  $\text{Ca}_9\text{Al}(\text{PO}_4)_7$ : $\text{Eu}^{3+}$ 的制备与发光特性[J]. 功能材料与器件学报, 2010, 16(5): 511-514.
- [12] Hu, Y., Zhuang, W., Ye, H., Zhang, S., Fang, Y. and Huang, X. (2005) Preparation and Luminescence of Properties of  $(\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{S}:\text{Eu}^{2+}$  Red-Emitting Phosphor for White LED. *Journal of Luminescence*, **111**, 139-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2004.07.005>
- [13] 耿秀娟, 田彦文, 陈永杰, 王瓚, 肖林久. 白光 LED 用新型硅基碳化物红色荧光粉研究进展[J]. 化工新型材料, 2010, 38(11): 15-17.
- [14] Som, S., Kumar, V., Kumar, V., *et al.* (2015) Dopant Distribution and Influence of Sonication Temperature on the Pure Red Light Emission of Mixed Oxide Phosphor for Solid State Lighting. *Ultrasonics Sonochemistry*, **28**, 79-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.07.003>
- [15] 李延垒. 红色长余辉发光材料的研究进展[J]. 韶关学院学报(自然科学版), 2010, 31(3): 73-76.
- [16] 贾冬冬, 姜联合, 刘玉龙, 等.  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{S}:\text{Bi}$ ,  $\text{Tm}$ ,  $\text{Cu}$  和  $\text{CaS}:\text{Eu}$  荧光材料的研究[J]. 发光学报, 1998, 19(4): 312-316.
- [17] Diallo, P.T., Boutinaud, P., Mahiou, R. and Cousseins, J.C. (1997) Red Luminescence in  $\text{Pr}^{3+}$ -Doped Calcium Titanates. *Physica Status Solidi*, **160**, 255-263. [http://dx.doi.org/10.1002/1521-396X\(199703\)160:1<255::AID-PSSA255>3.0.CO;2-Y](http://dx.doi.org/10.1002/1521-396X(199703)160:1<255::AID-PSSA255>3.0.CO;2-Y)
- [18] Pinel, E., Boutinaud, P. and Mahiou, R. (2004) What Makes the Luminescence of  $\text{Pr}^{3+}$  Different in  $\text{CaTiO}_3$  and  $\text{CaZrO}_3$ ? *Journal of Alloys and Compounds*, **380**, 225-229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.03.048>
- [19] 沈雷军, 赵增祺, 韩莉, 等.  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cd}$  对  $\text{CaTiO}_3$ : $\text{Pr}^{3+}$ 的发光性质的影响[J]. 发光学报, 2007, 28(1): 74-78.
- [20] Kuang, J.Y., Liu, Y.L. and Lei, B.F. (2006) Effect of  $\text{RE}^{3+}$  as A Co-Dopant in Long Lasting Phosphorescence  $\text{CdSiO}_3:\text{Mn}^{2+}$  ( $\text{RE} = \text{Y}, \text{La}, \text{Gd}, \text{Lu}$ ). *Journal of Luminescence*, **118**, 33-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2005.06.005>
- [21] Wang, X.J., Jia, D. and Yen, W.M. (2003) Mn Activated Green, Yellow, and Red Long Persistent Phosphors. *Journal of Luminescence*, **34**, 102-103.
- [22] Lei, B., Liu, Y., Liu, J., Ye, Z. and Shi, C. (2004) Pink Light Emitting Long-Lasting Phosphorescence in  $\text{Sm}^{3+}$ -Doped  $\text{CdSiO}_3$ . *Journal of Solid State Chemistry*, **177**, 1333-1337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssc.2003.11.006>
- [23] Lei, B., Liu, Y., Ye, Z. and Shi, C. (2004) Luminescence Properties of  $\text{CdSiO}_3:\text{Mn}^{2+}$  Phosphor. *Journal of Luminescence*, **109**, 215-219. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-2313\(04\)00147-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-2313(04)00147-4)

- [24] 姜洪义, 陈伟.  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  基新型长余辉发光材料的合成与性能[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(11): 5-7.
- [25] Lin, L., Yin, M., Shi, C. and Zhang, W. (2008) Luminescence Properties of a New Red Long-Lasting Phosphor:  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{Dy}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ . *Journal of Alloys and Compounds*, **455**, 327-330.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.01.059>
- [26] Fu, J. (1999) Orange and Red Emitting Long-Lasting Phosphors  $\text{MO}:\text{Eu}^{3+}$  ( $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ ). *Electrochemical and Solid-State Letters*, **3**, 350-351. <http://dx.doi.org/10.1149/1.1391146>
- [27] Wang, J., Wang, S.B. and Su, Q. (2004) The Role of Excess  $\text{Zn}^{2+}$  Ions in Improvement of Red Long Lasting Phosphorescence (LLP) Performance of  $\beta\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Mn}$  Phosphor. *Journal of Solid State Chemistry*, **177**, 895-900.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jssc.2003.09.027>
- [28] 李进, 袁良杰, 孙聚堂, 张克立. 掺杂  $\text{Eu}^{2+}$  的新型锶铝复合硫氧化物红色发光材料[J]. 中国稀土学报, 2002, 20(6): 597-600.
- [29] 朱小平, 于长风, 张脉官, 凌青, 戴静. 无机电致发光材料的制备方法与研究现状[J]. 中国陶瓷, 2006, 42(10): 19-23.
- [30] 马昌期, 王雪松, 张宝文, 曹怡. 有机电致发光红色发光材料研究进展[J]. 化学进展, 2004, 16(3): 463-473.
- [31] 毛国梁, 王猛. 有机金属配合物红色发光材料的研究进展[J]. 内蒙古石油化工, 2011, 37(4): 14-17.
- [32] 付慧英, 肖斐, 邵丙铄, 邵丙铄. 基于 N-苯基咪唑的红色有机电致发光材料[J]. 功能材料与器件学报, 2006, 12(4): 280-284.
- [33] 皮雅娟, 汤昊, 赵国生, 孙润光, 朱为宏. 高纯度红色掺杂型电致发光材料的合成及其性能研究[J]. 化学学报, 2008, 66(12): 1461-1464.
- [34] 陆慧. 新型红色荧光染料 DCJTB 的合成[D]. 南京: 南京师范大学, 2006.
- [35] 洪广言. 稀土化学导论[M]. 2014 年版. 北京: 科学出版社, 2014: 337-340.

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [japc@hanspub.org](mailto:japc@hanspub.org)