

# 关于水热合成 $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Yb}^{3+}, \text{Ho}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ 荧光粉的上转换白光研究

江 莉, 杨 骏

(西南大学 化学化工院, 重庆 400715)

**摘 要** 在无任何添加剂作用下仅通过简单水热法成功制备了  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Ln} = \text{Yb}^{3+}, \text{Ho}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ ) 荧光粉。在 980 nm 近红外激发下, 研究了荧光粉的上转换发光性质与能量传递机制,  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  的上转换发射光谱由绿色发射(539 nm)和红色发射(658 nm)组成,  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  的上转换发射光谱主要为蓝色发射(475 nm)。当三掺  $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  离子时, 成功制得较为理想的白色上转换荧光粉(0.3345, 0.3309), 与国际标准色度坐标值相接近(0.33, 0.33), 可能具有生物医学探针等潜在应用。

**关键词** 水热法; 上转换发光; 能量传递

**中图分类号** TB321

**文献标识码** A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



## Study on Up-conversion White Light of Hydrothermal Synthesis $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Yb}^{3+}, \text{Ho}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ Phosphors

JIANG Li, YANG Jun

(School of Chemistry and Chemistry Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract**  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Ln} = \text{Yb}, \text{Ho}, \text{Tm}$ ) phosphors were successfully prepared by simple hydrothermal method without any additives. The up-conversion luminescence properties and energy transfer mechanism of phosphor were studied under the excitation of 980 nm near-infrared. The up-conversion emission spectra of  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  were composed of green emission (539 nm) and red emission (658 nm), and the up-conversion emission spectra of  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  were mainly blue emission (475 nm). When  $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  ions doped, the relatively ideal up-conversion phosphors (0.3345, 0.3309) were successfully prepared, which were close to the international standard chrominance coordinate value (0.33, 0.33) and may have potential applications as biomedical probes.

**Key words** hydrothermal method; up-conversion luminescence; energy transfer

收稿日期: 2020-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51302229)资助

通讯作者: 杨骏, 男, 汉族, 博士, 教授, 研究方向: 稀土发光材料, E-mail: jyang@swu.edu.cn.

## 0 引言

稀土(RE)离子由于其丰富的能级及发光光谱而一直备受青睐,研究者们发现以稀土离子掺杂的荧光材料不仅在光学测温领域<sup>[1-3]</sup>显示了其优异性能,而且广泛应用在生物医学<sup>[4]</sup>、生物纳米探针<sup>[5]</sup>、玻璃大棚<sup>[6]</sup>、LED<sup>[7]</sup>等诸多领域。最近,稀土离子掺杂的白色上转换(UC)发光材料的研究赢得了大量关注<sup>[7-9]</sup>。纵观众多稀土离子中,在Yb<sup>3+</sup>离子作为敏化剂时,Er<sup>3+</sup>离子和Ho<sup>3+</sup>离子作为发光中心,受激发后(980 nm)能同时产生红色和绿色上转换发光,而Tm<sup>3+</sup>离子在激发后又能发出强蓝色排放,根据三基色原理(红绿蓝按一定比例复合能得到白色)因此常把Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>离子或Yb<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>离子共同掺杂到同一基质中而实现白色的上转换发光。例如Zhao的课题组利用无表面活性剂的水热合成法制备了Sr<sub>2</sub>ScF<sub>7</sub>纳米晶体,并通过三掺Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>离子首次得到了标准色度坐标为(0.320,0.330)的Sr<sub>2</sub>ScF<sub>7</sub>:Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>白色上转换荧光粉<sup>[7]</sup>。Jin等人采用热水法制得Ba(MoO<sub>4</sub>)<sub>0.5</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>0.5</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Ho<sup>3+</sup>,Tm<sup>3+</sup>纳米荧光粉,并利用XRD和SEM分别研究了其物相结构与粒径的大小<sup>[10]</sup>。众所周知,基质材料的物理结构和化学性质在稀土发光材料中扮演了举足轻重的角色,因此基质材料的选取显得尤为慎重。近些年,稀土发光材料蓬勃发展,已先后报道了氟化物<sup>[11,12]</sup>、钒酸盐<sup>[13]</sup>、磷酸盐<sup>[14]</sup>、钨酸盐<sup>[15]</sup>以及钼酸盐<sup>[16]</sup>等稀土荧光材料。其中,含副族元素的双钼酸盐晶体材料拥有特殊的白钨矿结构而具有较好的物理稳定性和化学性质,并且声子能量比较低因此受到了许多关注。然而,AgY(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Yb<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup>和AgY(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Yb<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>荧光粉的发光性质以及Yb<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>掺杂的白色上转换发光材料却少有文献报道<sup>[16,17]</sup>。合成荧光粉的方法多种多样,常见的有高温固相法<sup>[18]</sup>、溶胶凝胶法<sup>[19]</sup>、共沉淀法<sup>[20]</sup>、水热法<sup>[11]</sup>等,本文采用的简单的是水热合成方法。

本研究是在夏等人对AgY(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup>荧光粉的温敏性质的研究基础上进一步探究其上转换白光的性质。合成AgY(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Ln<sup>3+</sup>荧光粉依然是利用一步水热法,且分别研究了AgY(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Yb<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup>和AgY(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Yb<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>上转换的发光情况,以及由Yb<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>三掺调节上转换白色发射,探究了其上转换能量传递机制。

## 1 实验部分

### 1.1 实验过程

AgY(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Ln<sup>3+</sup>(Ln=Yb<sup>3+</sup>,Ho<sup>3+</sup>,Tm<sup>3+</sup>)荧光粉由简单水热法完成的,量35 mL去离子水于洗净并干燥的烧杯中,分别滴加1 mmol Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>,1 mmol AgNO<sub>3</sub>,少量的Yb(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>,Ho(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>和Tm(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>充分搅拌后呈透明溶液。搅拌半小时后,计算出2 mmol(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>的质量并准确称取,加到上述混合溶液中。在磁力搅拌下充分搅拌半个小时,将淡黄色液体转移至50 mL反应釜内胆中,并加蒸馏水至容器的80%,在200 °C的烘箱中恒温反应24 h。反应结束后完全冷却至室温,用去离子水以及无水乙醇反复清洗,然后离心,在60 °C恒温干燥箱中干燥一整晚得最终产品。

### 1.2 实验药品与试验仪器

1.2.1 实验试剂。Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Ln=Y,Yb, Ho,Tm),源自赣州市广利高新技术材料有限公司纯度为99%,钼酸铵((NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>),产自重庆川东化工有限公司,规格为分析纯,AgNO<sub>3</sub>规格为分析纯,购自成都科隆化工试剂厂,HNO<sub>3</sub>(AR)和乙醇都买自重庆钛新化工有限公司。Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>,Yb(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>,Ho(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>和Tm(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>是由其对应的氧化物为原始原材料,一边搅拌一边加热溶解在过量的浓硝酸中,经高温溶解反应后蒸发掉多余的硝酸,最后冷却至室温再稀释就得相应浓度的硝酸盐。

1.2.2 试验设备。AgY(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Ln<sup>3+</sup>(Ln=Yb<sup>3+</sup>,Ho<sup>3+</sup>,Tm<sup>3+</sup>)荧光粉的物相结构由MSALXD<sub>3</sub>仪器(产自北京普析通用仪器公司)检测,扫描范围为2θ:20°-70°。上转换发射光谱与白色上转换发射光谱均由Perkin-Elmer LS55 荧光光谱仪(型号:MDL-N-980-8)检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相

$\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:\text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Ln}=\text{Yb}^{3+},\text{Ho}^{3+},\text{Tm}^{3+}$ ) 荧光粉的 XRD 衍射图如图 1 所示(图中仅给出一部分荧光粉的衍射图),其衍射峰与标准卡片(JCPDS 52-0012)一一对应,没有检测到任何杂质峰,说明合成的荧光粉均可归属到纯白钨矿  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2$  中,并且产品纯度与结晶度良好。值得注意的是,  $\text{Yb}^{3+},\text{Ho}^{3+},\text{Tm}^{3+}$  离子的掺杂没有引入任何小杂峰,说明掺杂非常成功。这与  $\text{Yb}^{3+},\text{Ho}^{3+},\text{Tm}^{3+}$  离子与  $\text{Y}^{3+}$  离子所带电荷相等,且离子半径相差不大因此可以替代晶格位点上的  $\text{Y}^{3+}$  离子密切相关。

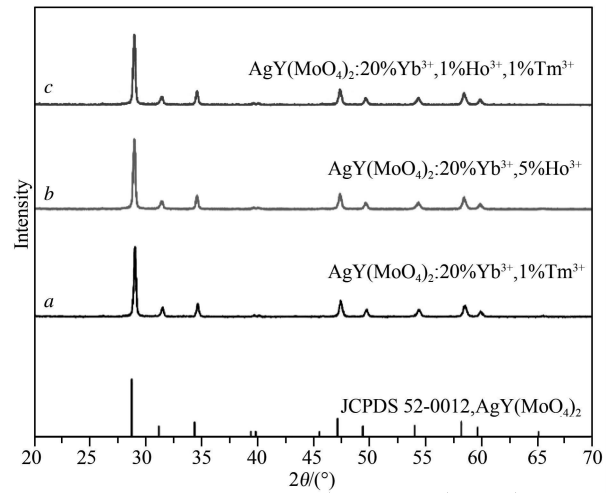


图 1  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:\text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Ln}=\text{Yb}^{3+},\text{Ho}^{3+},\text{Tm}^{3+}$ ) 荧光粉的 XRD 衍射图

### 2.2 $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},x\%\text{Ho}^{3+}$ 的上转换发光性质

图 2(a) 呈现的是测试波段为 450-750 nm 的  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},x\%\text{Ho}^{3+}$  ( $x=0.5,1,3,5,7,9$ ) 荧光粉的 UC 荧光强度(980 nm 激发)随  $\text{Ho}^{3+}$  离子掺杂量的变化,  $\text{Yb}^{3+}$  离子的掺杂浓度没有进一步探究。

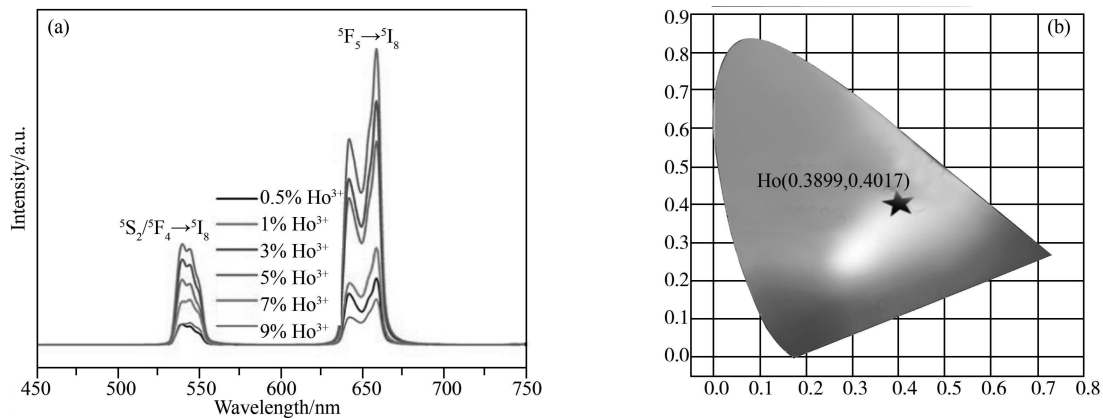


图 2 (a)  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},x\%\text{Ho}^{3+}$  荧光粉的发射光谱图; (b)  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},5\%\text{Ho}^{3+}$  荧光粉在色度坐标的位置

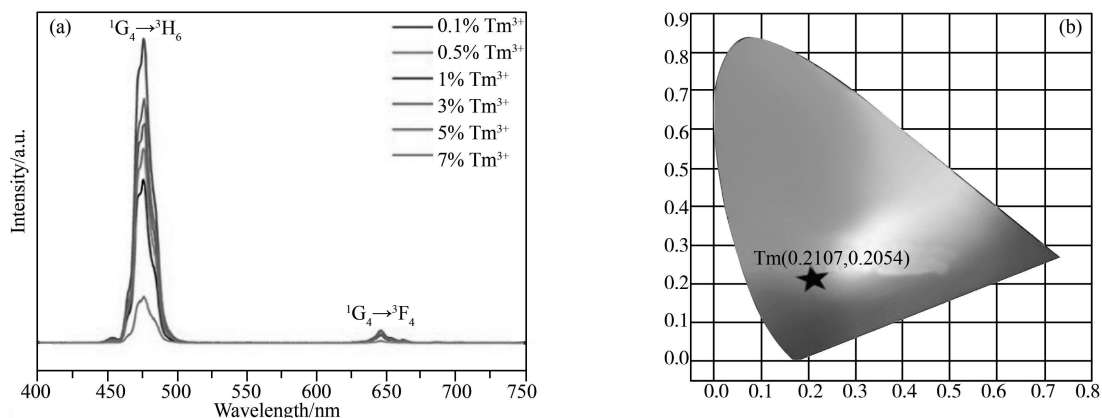


图 3 (a)  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},x\%\text{Tm}^{3+}$  荧光粉的发射光谱图; (b)  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+}$  荧光粉在色度坐标的位置

由图可知,  $\text{Ho}^{3+}$  离子掺杂量的改变对光谱峰的形状没有影响只影响其强度, 荧光强度与离子掺杂量的关系呈倒 U 型, 也就是先升后降的趋势, 当掺杂量为  $20\%\text{Yb}^{3+},5\%\text{Ho}^{3+}$  时发光强度为最佳。光谱图由 539 nm 处的绿色发射( $^5\text{S}_2, ^5\text{F}_4 \rightarrow ^5\text{I}_8$ )和 658 nm 处的红色发射( $^5\text{F}_5 \rightarrow ^5\text{I}_8$ )构成。  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},5\%$

$\text{Ho}^{3+}$  荧光粉发光整体呈黄色,其在色度坐标值为(0.3899,0.4017)(如图 2(b)所示)。

### 2.3 $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},x\%\text{Tm}^{3+}$ 的上转换发光性质

图 3(a)显示的是控制  $\text{Yb}^{3+}$  离子掺杂量为 20%时,仅改变  $\text{Tm}^{3+}$  离子的掺杂浓度的 UC 发射光谱图。由图可得,随着  $\text{Tm}^{3+}$  离子的掺杂量逐渐增加,荧光强度随之增强,直到掺杂量为 20% $\text{Yb}^{3+}$ ,1% $\text{Tm}^{3+}$  时,荧光强度到达最高点,而后掺杂离子量继续增加荧光强度反而降低,也就是高浓度的发光离子导致了浓度猝灭<sup>[7]</sup>。 $\text{Yb}^{3+}$ , $\text{Tm}^{3+}$  的发射光谱主要由强蓝色发射(475 nm)和微弱的红色发射(649 nm)组成。 $\text{Tm}^{3+}$  的电子从 $^1\text{G}_4$  基态能级填充至 $^3\text{H}_6$  激发态能级产生强蓝色发射,而弱红色发射则应归因为由  $\text{Tm}^{3+}$  离子的 $^1\text{G}_4$  能级辐射跃迁到 $^3\text{F}_4$  能级。如图 3(b),样品整体发蓝光,根据色温原理计算出其在色度坐标图上位置为(0.2107,0.2054)。

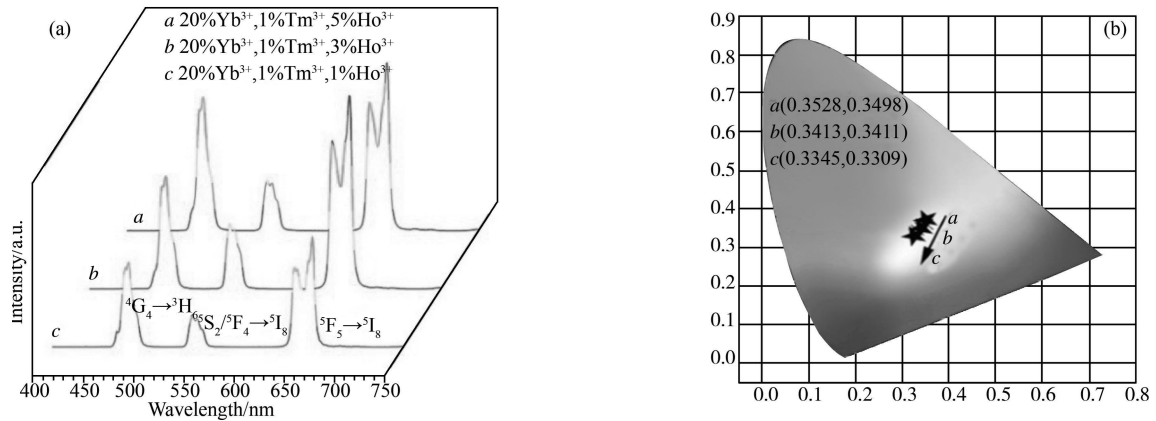


图 4 (a)  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+},x\%\text{Ho}^{3+}$  荧光粉的发射光谱图; (b)  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+},x\%\text{Ho}^{3+}$  荧光粉在色度坐标的位置

### 2.4 $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+},x\%\text{Ho}^{3+}$ 的白色上转换发光性质

基于以上分析,我们推测出在  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2$  荧光粉中通过三掺  $\text{Yb}^{3+}$ , $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  离子可以调节出白色上转换发射。为了证实上述猜测,我们合成了一系列  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+},x\%\text{Ho}^{3+}$  荧光粉(见图 4(a))。从图中我们可以直接观察到三掺的荧光光谱同时包含蓝色发射,绿色发射和红色发射,他们分别归因于  $\text{Tm}^{3+}$  离子的 $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ , $\text{Ho}^{3+}$  离子的 $^5\text{S}_2, ^5\text{F}_4 \rightarrow ^5\text{I}_8$  以及 $^5\text{F}_5 \rightarrow ^5\text{I}_8$  辐射跃迁(由于  $\text{Tm}^{3+}$  离子的红色发射微弱,因此,本文不进行讨论其红光对白光发射带来的影响)。同时,如图 4(b)随着  $\text{Ho}^{3+}$  离子的掺杂量降低, $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+},x\%\text{Ho}^{3+}$  荧光粉的色度坐标由黄白区(0.3528,0.3498)转变至白光区(0.3345,0.3309)。

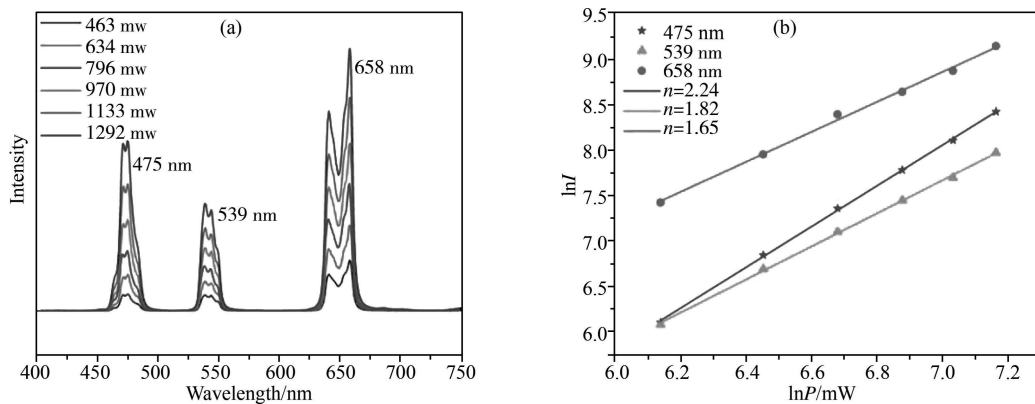


图 5 (a) 不同功率下的  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+},1\%\text{Ho}^{3+}$  UC 光谱图; (b) 荧光强度( $I_p$ )和泵浦功率( $P_w$ )的函数关系线性拟合图

### 2.5 $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+},1\%\text{Ho}^{3+}$ 的 UC 能量传递机制

为了进一步探究其能量传递机理,监测了不同功率下的荧光强度(图 5(a))。据文献报道,荧光强度

( $I_p$ )和泵浦功率( $P_w$ )的函数关系描写为<sup>[10]</sup>

$$I_p \propto P_w^n, \quad (1)$$

其中  $n$  是发光过程中所需的光子个数,其数值可以由非线性曲线拟合所得。如图 5(b)所示,拟合曲线的斜率即为  $n$  值,结果表明,在 475 nm 的蓝色发射的光子数为 2.24 属于双光子过程,539 nm 和 658 nm 处的绿色发射和红色发射的  $n$  值分别为 1.82 和 1.65 均属于双光子过程。

一般而言,UC 机制包含能量转移上转换(ETU)、激发态吸收(ESA)以及光子雪崩(PA)<sup>[21]</sup>。在衡量  $\text{Yb}^{3+},\text{Tm}^{3+},\text{Ho}^{3+}$  离子之间存在的吸收截面和掺杂量的显著性差异后, $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+},1\%\text{Ho}^{3+}$  荧光粉的 UC 机制为能量转移上转换(ETU),其具体传递过程见图 6。 $\text{Yb}^{3+}$  离子在 980 nm 激发下,吸收光子后,由 $^5\text{F}_{7/2}$ 能级跃迁至 $^5\text{F}_{5/2}$ 能级 [ $\text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{7/2} + 980 \text{ nm} \rightarrow \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{5/2}$ ]。随后, $\text{Yb}^{3+}$  离子将光子传递给  $\text{Ho}^{3+}$  离子, $\text{Ho}^{3+}$  离子的电子从基态 $^5\text{I}_8$ 填充至激发态 $^5\text{I}_6$  [ $\text{Ho}^{3+}:^5\text{I}_8 + \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{7/2} \rightarrow \text{Ho}^{3+}:^5\text{I}_6 + \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{5/2}$ ]。紧接着 $^5\text{I}_6$ 能级经非辐射弛豫回到 $^5\text{I}_7$ 能级,发生 $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{F}_5$ 的跃迁 [ $\text{Ho}^{3+}:^5\text{I}_7 + \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{7/2} \rightarrow \text{Ho}^{3+}:^5\text{F}_5 + \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{5/2}$ ], $^5\text{F}_5$ 能级的辐射释放产生红光。此外, $^5\text{I}_6$ 能级在  $\text{Yb}^{3+}$  离子作用下跃迁至 $^5\text{S}_2,^5\text{F}_4$ 能级是绿光产生的原因 [ $\text{Ho}^{3+}:^5\text{I}_6 + \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{7/2} \rightarrow \text{Ho}^{3+}:^5\text{S}_2,^5\text{F}_4 + \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{5/2}$ ]。至于  $\text{Tm}^{3+}$  离子,吸收  $\text{Yb}^{3+}$  离子传递的光子后,发生 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_5$ 的辐射跃迁 [ $\text{Tm}^{3+}:^3\text{H}_6 + \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{7/2} \rightarrow \text{Tm}^{3+}:^3\text{H}_5 + \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{5/2}$ ], $^3\text{H}_5$ 能级的非辐射跃迁后, $^3\text{F}_4$ 能级跃迁至 $^3\text{F}_2$ 能级。然后,再次经过非辐射跃迁( $^3\text{F}_2 \sim ^3\text{H}_4$ ),最后, $\text{Tm}^{3+}$  离子的 $^3\text{H}_4$ 能级跃迁至 $^1\text{G}_4$ 能级 [ $\text{Tm}^{3+}:^3\text{H}_4 + \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{7/2} \rightarrow \text{Tm}^{3+}:^1\text{G}_4 + \text{Yb}^{3+}:^5\text{F}_{5/2}$ ],然后辐射释放生成蓝光。

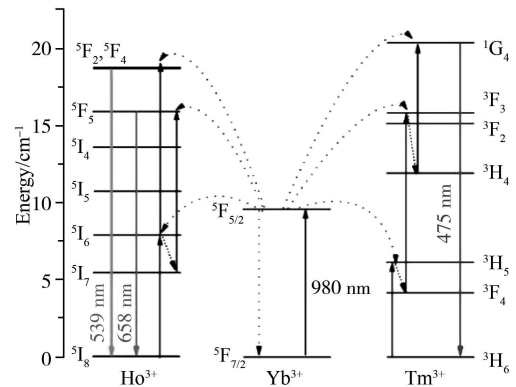


图 6  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+},1\%\text{Ho}^{3+}$  荧光粉 UC 能量传递过程

### 3 结论

通过简单水热法成功制备了  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:\text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Ln}=\text{Yb}^{3+},\text{Ho}^{3+},\text{Tm}^{3+}$ ) 荧光粉。考察了荧光粉的上转换发光性质与能量传递机制,在 980 nm 激发下,  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  荧光粉的上转换发射光谱由绿色发射(539 nm)和红色发射(658 nm)组成, $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  荧光粉的上转换发射光谱主要为蓝色发射(475 nm)。本文制得的  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2:20\%\text{Yb}^{3+},1\%\text{Tm}^{3+},1\%\text{Ho}^{3+}$  白色上转换荧光粉(0.3345,0.3309),与国际标准色度坐标值相接近(0.33,0.33),可能具有生物医学探针等潜在应用,其他应用还需后续深入研究。

### 参 考 文 献

- [1] 刘玉莲,毛旖旎,杨骏.关于 $[\text{CaY}]\text{F}_2:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$ 荧光粉的水热合成、上转换发光性质及温度传感能力的探究[J].聊城大学学报(自然科学版),2020,33(4):39-44.
- [2] 夏文鹏,江莉,胡珊珊.镧系离子掺杂的  $\text{AgY}(\text{MoO}_4)_2$  上转换荧光粉的形貌调控及其温敏性研究[J].聊城大学学报(自然科学版),2020,33(5):60-65.
- [3] 明成国,陈慧萱,裴煜婷. $(\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.99})(\text{W}_{x/2}\text{Al}_{1-x})_8\text{O}_{12}$  纳米粉的制备与荧光特性研究[J].聊城大学学报(自然科学版),2020,33(6):82-87.
- [4] HUANG Y, SKRIPKA A, LABRADOR-PÁEZ L, et al. Upconverting nanocomposites with combined photothermal and photodynamic effects. *Nanoscale*, 2018, 10 (2): 791-799.
- [5] YUAN N, LIU D Y, YU X C, et al. A biological nano-thermometer based on ratiometric luminescent  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$  nanocrystals. *Materials Letters*, 2018, 218: 337-340.

- [6] 明成国,裴嫄亭,陈慧萱.应用于玻璃温室大棚的 Eu/Mn/Sm 三掺磷酸盐玻璃陶瓷的荧光性能研究[J].聊城大学学报(自然科学版), 2020, 33(1): 53-56.
- [7] ZHAO B, SHEN D, YANG J, et al. Lanthanide-doped  $\text{Sr}_2\text{ScF}_7$  nanocrystals: controllable hydrothermal synthesis, the growth mechanism and tunable up/down conversion luminescence properties[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5 (13): 3264-3275.
- [8] SAMANTA B, DEY A K, BHAUMIK P, et al. Controllable white light generation from novel  $\text{BaWO}_4: \text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  nanophosphor by modulating sensitizer ion concentration[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 30 (2): 1068-1075.
- [9] CHO K, CHOI J, KIM K M, et al. Upconversion luminescence of  $\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  tri-doped  $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2$  phosphors[J]. *Ceramics International*, 2015, 41: S668-S674.
- [10] JIN J, YANG K, SU J, et al. White up-conversion emission in  $\text{Ba}(\text{MoO}_4)_{0.5}(\text{WO}_4)_{0.5}: \text{Yb}^{3+}, \text{Ho}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$  nano-phosphor[J]. *Journal of Luminescence*, 2015, 159: 178-182.
- [11] 毛旖旎,杨骏.水热合成  $\text{Ba}_3\text{Sc}_2\text{F}_{12}: \text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$  荧光粉的形貌及其上转换发光性能的探究[J].聊城大学学报(自然科学版), 2020, 33(2): 68-72.
- [12] 毛旖旎,胡珊珊.基于  $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$  能量传递的荧光粉[J].聊城大学学报(自然科学版), 2020, 33(3): 51-56.
- [13] GETZ M N, NILSEN O, HANSEN P-A. Sensors for optical thermometry based on luminescence from layered  $\text{YVO}_4: \text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Tm}, \text{Yb}$ ) thin films made by atomic layer deposition[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1): 1-9.
- [14] 赵丹,赵丹丹,薛亚丽.一种新型蓝色发光材料  $\text{Na}_{13}\text{Sr}_2\text{Ta}_2(\text{PO}_4)_9: \text{Tm}^{3+}$  的合成及性能研究[J].聊城大学学报(自然科学版), 2020, 33(5): 66-73.
- [15] LIN M, XIE L, WANG Z, et al. Facile synthesis of mono-disperse sub-20 nm  $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2: \text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$  upconversion nanoparticles: a new choice for nanothermometry[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7 (10): 2971-2977.
- [16] LI T, GUO C, ZHOU S, et al. Highly Sensitive Optical Thermometry of  $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$  Codoped  $\text{AgLa}(\text{MoO}_4)_2$  Green Upconversion Phosphor [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, 98 (9): 2812-2816.
- [17] XIA W, ZHANG Y, HU S, et al. Self-assembled hierarchical architecture of tetragonal  $\text{AgLa}(\text{MoO}_4)_2$  crystals: hydrothermal synthesis, morphology evolution and luminescence properties[J]. *CrystEngComm*, 2018, 20 (13): 1832-1843.
- [18] ZHANG L, DONG L, SHAO B, et al. Novel NIR  $\text{LaGaO}_3: \text{Cr}^{3+}, \text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Ln} = \text{Yb}, \text{Nd}, \text{Er}$ ) phosphors via energy transfer for C-Si-based solar cells[J]. *Dalton Trans*, 2019, 48 (30): 11460-11468.
- [19] 明成国,陈慧萱,裴嫄亭.应用于光学温度传感器的  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺的 YAG 晶体的光热性能研究[J].聊城大学学报(自然科学版), 2020, 33(2): 73-77.
- [20] LIU C, GAO Z, ZENG J, et al. Magnetic/Upconversion Fluorescent  $\text{NaGdF}_4: \text{Yb}, \text{Er}$  Nanoparticle-Based Dual-Modal Molecular Probes for Imaging Tiny Tumors in Vivo[J]. *Acs Nano*, 2013, 7(8): 7227-7240.
- [21] DONG H, SUN L D, YAN C H. Energy transfer in lanthanide upconversion studies for extended optical applications[J]. *Chem Soc Rev*, 2015, 44 (6): 1608-34.