

$\text{Li}_y\text{Mg}_{2-x-y}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ 磷酸盐基质荧光粉的制备及发光性能研究

冯晓琴 张 锋 陈天保 张红燕 张文娟 黄宏升*

(贵州理工学院化学工程学院, 贵阳 550003)

摘 要 采用高温固相法制备得到了新型磷酸镁基质荧光粉 $\text{Li}_y\text{Mg}_{2-x-y}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$, 利用红外光谱(FT-IR)和 X 射线衍射(XRD)等手段对产品进行了表征, 研究了 Tb^{3+} 、 Li^+ 掺杂量对其物相及发光强度的影响。结果表明: Tb^{3+} 的掺入对其产品物相有一定影响, Li^+ 的掺杂对产品物相影响较小。 Tb^{3+} 和 Li^+ 的最佳掺杂摩尔分数均为 12%, Li^+ 的掺入对其激发峰及发射峰位置基本没有影响, 但能有效提高产品的发光强度。该荧光粉的最强激发峰位于波长 371nm 处, 最强发射峰位于波长 545nm 处, 为绿色发光, 是良好的近紫外激发绿色发光材料。

关键词 高温固相法, 磷酸盐, 电荷补偿, 荧光粉

Preparation and property of $\text{Li}_y\text{Mg}_{2-x-y}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ phosphate based phosphor

Feng Xiaoqin Zhang Feng Chen Tianbao Zhang Hongyan Zhang Wenjuan
Huang Hongsheng

(School of Chemical Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003)

Abstract $\text{Li}_y\text{Mg}_{2-x-y}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$, a new magnesium phosphate based phosphor was prepared by high-temperature solid-state method. The product was characterized by FT-IR and XRD. The effects of Tb^{3+} , Li^+ doping amount on its phase and luminescence intensity were studied. The results shown that the doping of Tb^{3+} had a certain effect on the purity of the product, and the doping of Li^+ had a little effect on the phase of the product. The optimum doping concentrations both of the Tb^{3+} and Li^+ were 12%, respectively. The doping of Li^+ had little effect on the excitation peak and emission peak position, but can effectively improve the luminescence intensity of the product. The strongest excitation peak and emission peak of the phosphor were located at $\lambda = 371\text{nm}$ and $\lambda = 545\text{nm}$ respectively. It was a good green luminescent material with near ultraviolet excitation.

Key words high temperature solid state method, phosphate, charge compensation, phosphor

随着人类社会的发展,对荧光粉的需要量急剧增加,而传统的稀土磷酸盐类荧光粉,因存在价格高的不足,使其大范围应用受到严重限制。这就亟需研发价格低廉且性能优异的新型荧光粉材料对其进行替代。研究表明碱土金属同样有良好的荧光效果,且价格低廉,因而,用碱土金属替代稀土离子可以有效地降低成本,进而为荧光粉的广泛应用奠定基础^[1]。而碱金属/碱土金属磷酸盐基质材料,因其制备条件温和、发光性能优良且物化性质稳定而使用最为广泛。如 $\text{A}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{RE}$ ($\text{A} = \text{碱/碱土金属离子}$, $\text{RE} = \text{稀土离子}$) 型材料,焦磷酸盐中的碱/碱土金属离子紧紧包围在 $[\text{P}_2\text{O}_7]$ 基团周围,使其具有更

好的稳定性^[2]。

激活剂对荧光材料同样至关重要,在稀土磷酸盐类材料中, Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 和 Dy^{3+} 这 3 种激活离子因其发光强度大,而应用较多^[1]。此外,因稀土离子的 4f 及 5d 轨道上,尤其是 4f 壳层拥有众多电子跃迁模式,使得稀土发光材料具有一般发光材料无法比拟的光谱性质^[3]。为了制备价格低廉且性能优异的荧光材料,目前研究者们已采用高温固相法、水热法和共沉淀法等方法制备了多种稀土离子掺杂的磷酸盐基质荧光材料,目前被报道过得有: $\text{LiBaPO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 、 $\text{Zn}_2\text{Ca}(\text{PO}_4)_2:\text{Tb}^{3+}$ 、 $\text{LiSrPO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 、 $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)\text{Cl}:\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Ca}_{2.92}\text{Na}_{0.04}$

基金项目:国家自然科学基金(21503044);贵州省科学技术基金(黔科合 J 字[2015]2060);国家大学生创新创业项目(201614440013)

作者简介:冯晓琴(1984-),女,硕士,讲师,主要从事无机发光材料的研究。

联系人:黄宏升(1982-),男,教授,主要从事无机功能材料研究。

$\text{Eu}_{0.04}(\text{PO}_4)_2$ 、 LnPO_4 :Tb, Bi (Ln=La, Gd)、 $\text{La}_{1-3x}\text{PO}_4:2x\text{Ce}^{3+}, x\text{Tb}^{3+}$ 等^[4-19]。需要指出的是, 因为添加激活剂的原因, 会造成最后的荧光材料存在不等价取代的问题, 为了保持电中性, 一般采用碱金属来充当电荷补偿剂^[1]。

目前, 对于碱土金属磷酸盐基质掺杂稀土作为荧光材料的研究主要集中在以碱土金属磷酸盐为基质, Tb^{3+} 为激活剂的荧光材料, 而对于采用焦磷酸镁为基质掺杂 Tb^{3+} 和 Li^+ 的荧光材料却鲜有报道。为进一步研究碱土金属磷酸盐基质荧光粉的发光性能, 本研究采用高温固相法合成了以 Tb^{3+} 离子为激活剂, Li^+ 为电荷补偿剂掺杂的磷酸盐基质荧光粉, 并考察了 Tb^{3+} 和 Li^+ 掺杂浓度对材料荧光性能的影响。

1 实验部分

1.1 原材料

磷酸二氢铵 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)、碱式碳酸镁 [$(\text{MgCO}_3)_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$]、氧化铽 (Tb_4O_7)、碳酸锂 (Li_2CO_3), 均为分析纯。

1.2 样品的制备

1.2.1 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 基质的制备

以 $(\text{MgCO}_3)_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 为原料, 按 $\text{Mg}/\text{P}=1.1$ 的化学计量比称量, 将称量后的药品放入玛瑙研钵中, 研磨混匀, 放置于坩埚中, 将坩埚转移到马弗炉于 1000°C 下煅烧 3h, 自然冷却到室温, 得到 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 基质。

1.2.2 掺杂 Tb^{3+} 的 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 基质荧光粉的制备

按 $\text{Mg}/\text{P}=1.1$ 的化学计量比称量 $(\text{MgCO}_3)_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 并掺杂一定量的 Tb_4O_7 (按 Tb^{3+} 摩尔分数计, 分别为 2%、4%、6%、8%、10%、12% 和 14%), 将称量后的药品放入玛瑙研钵中研磨混匀, 放置于坩埚中, 将坩埚转移到马弗炉中于 1000°C 下煅烧 3h, 自然冷却到室温, 制得掺杂 Tb^{3+} 的荧光粉 $\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ 。

1.2.3 掺杂 Tb^{3+} 和 Li^+ 的 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 基质荧光粉的制备

与制备掺杂 Tb^{3+} 的 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 基质荧光粉类似, 按 $\text{Mg}/\text{P}=1.1$ 的化学计量比称量 $(\text{MgCO}_3)_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 掺杂 Tb_4O_7 (按 Tb^{3+} 计 12%) 和 Li_2CO_3 (按 Li^+ 摩尔分数计分别为 2%、4%、6%、8%、10%、12%、14%) 制得 $\text{Li}_y\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ 型荧光粉。

1.3 测试与表征

利用傅里叶红外光谱仪 (FT-IR, VERTEX 80 型, 布鲁克公司) 和 X 射线粉末衍射仪 (XRD, Rigaku Ultima IV 型, 日本理学公司) 对产物的物相进行表征; 采用荧光分光光度计 (F97 型) 测试样品的激发和发射光谱。其中 FT-IR 的工作条件为: KBr 压片法制样, 波数范围: $400 \sim 4000\text{cm}^{-1}$; XRD 的工作条件为: 电压 40kV, 电流 40mA, 扫描步进为 0.02° , 扫描速度为 $8^\circ/\text{min}$, 扫描范围为 $10 \sim 70^\circ$; 荧光分光光度计的工作条件为 150W 氙灯, 激发带宽和发射带宽为 2nm, 扫描速度 $300\text{nm}/\text{min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 FT-IR 分析

图 1 为 $\text{Mg}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ 基质 (样品 A)、 $\text{Mg}_{1.88}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ (样品 B) 和 $\text{Li}_{0.12}\text{Mg}_{1.88}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ (样品 C) 的 FT-IR 谱图。由图可见, 样品 B 和 C 的红外特征峰与样品 A 基本一致, 但因掺杂 Li^+ 和 Tb^{3+} 的原因导致样品 B 和 C 的结构发生了一定程度的变化, 进而导致其特征吸收峰的位置相对样品 A 发生了微小的偏移。此外, 样品 A、B、C 在 $730 \sim 1000\text{cm}^{-1}$ 处出现较强的吸收峰, 归属于 P—O 的对称伸缩振动峰; 在 $1100 \sim 1300\text{cm}^{-1}$ 区间内出现两个较明显的吸收峰, 为 O—P—O 的不对称伸缩振动峰。另外, 3 个样品在 $1300 \sim 4000\text{cm}^{-1}$ 范围内均没有出现归属于 O—H 键的伸缩振动峰, 说明样品干燥且不含结晶水。

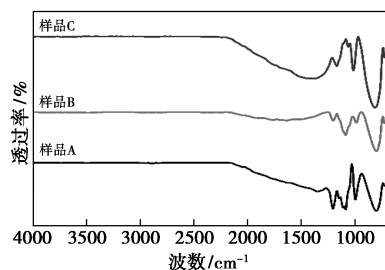


图 1 $\text{Mg}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ 基质 (样品 A)、 $\text{Mg}_{1.88}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ (样品 B) 和 $\text{Li}_{0.12}\text{Mg}_{1.88}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ (样品 C) 的 FT-IR 谱图

2.2 XRD 分析

图 2 为 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 基质和不同 Tb^{3+} 掺杂浓度下的荧光粉 $\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ 的 XRD 谱图。由图可见, 制备所得 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 基质所有衍射峰与 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (JCPDS: 32-0626) 相关衍射峰位置基本一致。表明实验制备的 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 基质为纯相。当掺杂不同量的 Tb^{3+} 部分取代 Mg^{2+} 进入基质时,

$\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ 荧光粉的主要峰位置与基质及 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 标准物质没有明显差异;但随着 Tb^{3+} 掺杂量的增加, $\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ 的 XRD 谱图开始出现 TbPO_4 衍射峰(见图2中标*的位置), TbPO_4 衍射峰的强度随 Tb^{3+} 掺杂量的增加而增强,而 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 衍射峰强度随之而减弱。结果表明随着 Tb^{3+} 掺杂量的增加,基质结构受到一定影响,结晶度降低,这可能是因为 Tb^{3+} 的离子半径($r=0.092\text{nm}$)大于 Mg^{2+} 的离子半径($r=0.072\text{nm}$),因而随着 Tb^{3+} 掺杂量的增加,导致晶体内部结构发生一定的变化,从而使得基质的结晶度降低。

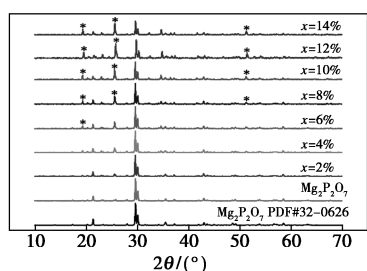


图2 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 和 $\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ ($x=2\%\sim 14\%$) 的 XRD 谱图

图3为 $\text{Li}_y\text{Mg}_{1.88}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ ($y=2\%\sim 14\%$) 的 XRD 谱图。由图可见,当 $\text{Mg}_{1.88}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ 荧光粉掺杂入不同量的 Li^+ 后,样品的基质峰位置同标准谱图相比,没有明显变化,但出现了 TbPO_4 衍射峰,这是由于 Tb^{3+} 的掺杂而出现。从图3中还可以看出, Li^+ 掺杂量的变化对荧光粉衍射峰强度的影响并不明显,这说明样品的结晶度受 Li^+ 掺杂量的影响较小。这可能是因为 Li^+ 的离子半径($r=0.076\text{nm}$)与取代的 Mg^{2+} 的离子半径相似($r=0.072\text{nm}$),因而对荧光粉内部结构的影响较小。

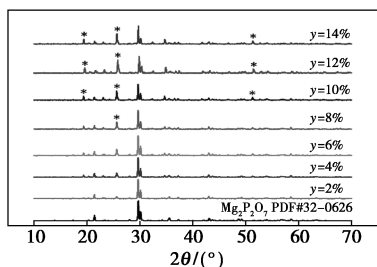


图3 $\text{Li}_y\text{Mg}_{1.88-y}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ ($y=2\%\sim 14\%$) 的 XRD 谱图

2.3 荧光光谱分析

图4为 $\text{Mg}_{1.88}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ 在 545nm 监测波长下所得的激发光谱图。由图可见, 303nm 、 319nm 、 343nm 、 351nm 、 360nm 、 371nm 、 378nm 和

489nm 处出现明显的激发峰,分别对应于 Tb^{3+} 的 $^7\text{F}_6-^5\text{H}_6$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{H}_7$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{L}_7$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{L}_9$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{D}_2$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{L}_{10}$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{G}_6$ 和 $^7\text{F}_6-^5\text{D}_4$ 的 f-f 跃迁。其中波长为 371nm 时,荧光强度最强。由此可知样品最佳激发波长为 371nm ,表明此物质适合用于 UVLED ($350\sim 410\text{nm}$) 激发荧光粉。

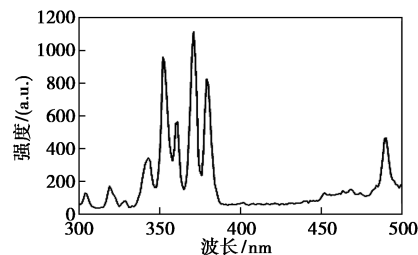


图4 $\text{Mg}_{1.88}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ 荧光粉的激发光谱图 ($\lambda_{\text{em}}=545\text{nm}$)

图5为 $\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ ($x=2\%\sim 14\%$) 荧光粉在 371nm 激发下的发射光谱图。由图可见, 489nm 、 545nm 、 589nm 和 621nm 处的发射峰分别归属于 Tb^{3+} 的 $^5\text{D}_4-^7\text{F}_6$ 、 $^5\text{D}_4-^7\text{F}_5$ 、 $^5\text{D}_4-^7\text{F}_4$ 和 $^5\text{D}_4-^7\text{F}_3$ 能级跃迁。其中最强发射峰处于 545nm ,属于 $^5\text{D}_4-^7\text{F}_5$ 跃迁,说明此跃迁在荧光发射当中占主导地位,荧光粉发射绿色光,是一种良好的绿色发光荧光材料。掺杂不同量的 Tb^{3+} 并未改变发射峰的位置,但随着 Tb^{3+} 浓度的增加,荧光粉的荧光强度呈现先增强后减弱的趋势,当 Tb^{3+} 浓度掺杂浓度为 12% 时,波长为 545nm 处的荧光强度最强,为绿色荧光。

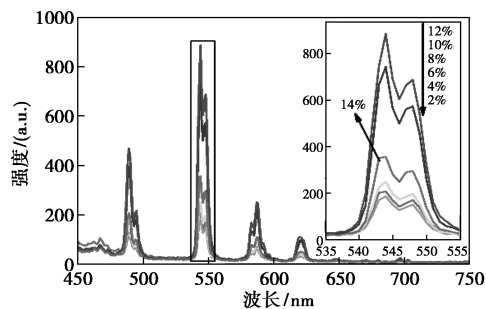


图5 $\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ ($x=2\%\sim 14\%$) 荧光粉发射强度随 Tb^{3+} 浓度变化的发射光谱图 ($\lambda_{\text{ex}}=371\text{nm}$, 插图为局部放大图)

图6为 $\text{Li}_{0.12}\text{Mg}_{1.88}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ 在 545nm 监测波长下的激发光谱图。由图可见, 303nm 、 319nm 、 343nm 、 352nm 、 360nm 、 371nm 、 378nm 和 489nm 位置出现明显的激发峰,分别对应于 Tb^{3+} 的 $^7\text{F}_6-^5\text{H}_6$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{H}_7$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{L}_7$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{L}_9$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{D}_2$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{L}_{10}$ 、 $^7\text{F}_6-^5\text{G}_6$ 和 $^7\text{F}_6-^5\text{D}_4$ 的 f-f 跃迁,其最强激发峰位于波长 371nm 处(近紫外区)。与未掺杂 Li^+ 的 $\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ 激发峰位置基本一致,但

其激发峰强度较 $\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ 明显增加。

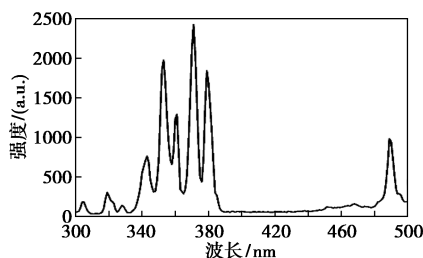


图 6 $\text{Li}_{0.12}\text{Mg}_{1.76}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ 的激发光谱图
($\lambda_{\text{em}}=545\text{nm}$)

图 7 为掺杂不同电荷补偿剂量时 $\text{Li}_y\text{Mg}_{1.88-y}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ 荧光粉的发射光谱图。由图可见,当 Tb^{3+} 掺杂浓度固定($x=12\%$)时,掺杂不同量的电荷补偿剂 Li^+ 之后发射峰位置没有明显变化。随着 Li^+ 浓度的增加,其荧光强度呈现先增强后减弱的趋势,当 Li^+ 浓度掺杂浓度为 12%,波长为 545nm 时,荧光强度最强。与未掺杂 Li^+ 的 $\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ 相比, $\text{Li}_y\text{Mg}_{1.88-y}\text{P}_2\text{O}_7:0.12\text{Tb}^{3+}$ 的发光强度有明显提升,位于 545nm 处的发光强度最高提高了约 2.3 倍,发光性能良好。其原因可能是 Tb^{3+} 取代基质中的 Mg^{2+} ,造成电荷价态不匹配,电荷补偿剂 Li^+ 对其进行电荷补偿,由于 Li^+ 离子半径较小(0.059nm),更容易进入基质晶格,提高了 Tb^{3+} 的跃迁发射几率。

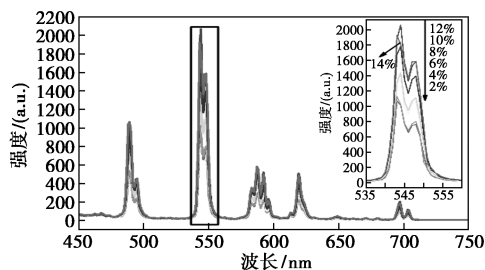


图 7 $\text{Li}_y\text{Mg}_{1.88-y}\text{P}_2\text{O}_7:\text{Tb}^{3+}$ ($y=2\%\sim 14\%$)
荧光粉发射强度随 Li^+ 浓度变化的发射光谱图
($\lambda_{\text{ex}}=371\text{nm}$,插图为局部放大图)

3 结论

采用高温固相法制备得到了新型磷酸镁基质荧光粉 $\text{Li}_y\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$,并利用 FT-IR、XRD 和荧光光谱仪对其进行表征。研究了 Tb^{3+} 、 Li^+ 掺杂对其物相及发光性能的影响,结果表明随着 Tb^{3+} 掺杂量的增加, TbPO_4 杂质峰强度增强, Li^+ 的掺入对荧光粉物相影响不大。 $\text{Li}_y\text{Mg}_{2-x-y}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ 系列荧光粉最强发射峰位于波长 545nm 处,最强激发峰位于波长 371nm 处,产品发射绿光。研究发现 Tb^{3+} 最佳掺杂量为 12%, Li^+ 掺杂未改变其激发峰

及发射峰位置,但能有效提高产品的发光强度,当 Li^+ 为最佳掺杂量 12% 时,其荧光强度较未掺杂 Li^+ 时提升了约 2.3 倍。结果表明 $\text{Li}_y\text{Mg}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7:x\text{Tb}^{3+}$ 是一种良好的绿色荧光粉,在 UVLED 荧光粉领域有潜在的应用前景。

参考文献

- [1] 张耀明,磷酸盐绿色荧光粉的制备及其发光性能的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2008.
- [2] 徐梦姣,焦磷酸盐基质发光材料的制备及发光性能[D].乌鲁木齐:新疆大学,2013.
- [3] 徐叙珩,苏勉曾,发光学与发光材料[M].北京:化学工业出版社,2004,273-287.
- [4] Lin C C, Xiao Z R, Guo G Y, et al. Versatile phosphate phosphors ABPO_4 in white light-emitting diodes: collocated characteristic analysis and theoretical calculations[J]. Journal of the American Chemical Society, 2010, 132: 3020-3028.
- [5] 杨志平,白光二极管用荧光粉 $\text{LiBaPO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 的制备及发光性质[J].硅酸盐学报,2010,38(6):1107-1111.
- [6] 王惠琴,胡建国,余兴海,等.焦磷酸铋:铕(II)的晶体形貌与发光性能的关系[J].复旦学报,1984,23(3):259-266.
- [7] 黄竹坡,李铭华,郑朝贵,卤磷酸铋基质中 Ce^{3+} 的发光性质[J].中国稀土学报,1990,8(2):121-126.
- [8] 张志伟,王晓娟,任艳军.电荷补偿剂增强的 $\text{Ca}_{2.96}\text{Eu}_{0.04}(\text{PO}_4)_2$ 红色荧光粉[J].发光学报,2014,35(9):1071-1075.
- [9] 童鑫辉.两类磷酸盐荧光粉形貌调控及发光性能的研究[D].北京:中国地质大学,2016.
- [10] Wang Y, Wu C, Wei J. Hydrothermal synthesis and luminescent properties of $\text{LnPO}_4:\text{Tb}, \text{Bi}$ ($\text{Ln}=\text{La}, \text{Gd}$) phosphors under UV/VUV excitation[J]. Journal of Luminescence, 2007, 126(2):503-507.
- [11] Kang K, Zhuang W, He D, et al. Luminescent properties and preparation of $\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Tb}$ green phosphor[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2004, 22(2):206-209.
- [12] 董玮利.稀土掺杂磷酸镧发光材料的制备与发光性能研究[D].长春:长春理工大学,2016.
- [13] 来华.纳米稀土磷酸盐发光材料的合成以及发光性能的研究[D].长春:吉林大学,2009.
- [14] 杨志平.绿色荧光粉 $\text{NaCaPO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 的制备与发光特性[J].发光学报,2008,29(1):81-84.
- [15] Huang J, Gao R, Lu Z, et al. Sol-gel preparation and photoluminescence enhancement of Li^+ and Eu^{3+} co-doped YPO_4 nanophosphors[J]. Optical Materials, 2010, 32(9):857-861.
- [16] 李文兰.白光 LEDs 用掺稀土磷酸盐、焦磷酸盐发光材料的制备及性能研究[D].长沙:中南林业科技大学,2012.
- [17] 贾晓丹.稀土掺杂三偏磷酸镧和焦磷酸盐发光材料的制备与性能[D].贵阳:贵州师范大学,2015.
- [18] 冯章雷. $\text{Eu}(\text{II})$ 或 $\text{Eu}(\text{III})$ 激发的偏磷酸盐的合成、发光及其在发光二极管中的应用研究[D].广州:中山大学,2010.
- [19] 杨莉,孙尚梅,陈铁. Tb^{3+} , Gd^{3+} 掺杂 LaPO_4 纳米棒的合成及其发光性质研究[J].延边大学学报(自然科学版),2012,38(1):61-70.

收稿日期:2018-10-23

修稿日期:2019-02-12