

文章编号: 1000-7032(2013)08-0953-06

$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 : \text{Ce}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$ 的发光性质及其能量传递机制

林 剑^{1,2}, 郝振东¹, 张 霞¹, 张家骅^{1*}

(1. 发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用高温固相法在弱还原气氛下合成了一系列 $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 : \text{Ce}^{3+}, \text{Sm}^{3+}, \text{Li}^+$ 荧光粉, 研究了该荧光粉的发光性质以及能量传递机制。当 Ce^{3+} 摩尔分数固定在 1% 时, Sm^{3+} 掺杂摩尔分数为 2% 时样品的红光发射最强。在 360 nm 激发下, 可以证明从 Ce^{3+} 到 Sm^{3+} 存在有效的能量传递。能量传递效率最高可达 55.8%。运用 Inokuti-Hirayama 模型对 $\text{Ce}^{3+}-\text{Sm}^{3+}$ 能量传递类型进行分析, 结果表明该能量传递类型为偶极子-偶极子相互作用。能量传递的临界距离经计算为 0.55 nm。

关键词: Ca_2SiO_4 ; 能量传递; Inokuti-Hirayama 模型; 荧光粉

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20133408.0953

Photoluminescence and Energy Transfer Properties of $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 : \text{Ce}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$

LIN Jian^{1,2}, HAO Zhen-dong¹, ZHANG Xia¹, ZHANG Jia-hua^{1*}

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhangjh@ciomp.ac.cn

Abstract: A series of $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 : 0.01\text{Ce}^{3+}, x\text{Sm}^{3+}, (0.01+x)\text{Li}^+$ ($x = 0 \sim 0.05$) phosphors were synthesized under a weak reducing atmosphere by traditional solid state reactions. Photoluminescence and energy transfer (ET) properties were investigated in detail. When the mole fraction of Ce^{3+} was fixed at 1%, the sample of $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.02\text{Sm}^{3+}, 0.03\text{Li}^+$ shows the highest red light emitting. Under 360 nm UV excitation, efficient Ce^{3+} to Sm^{3+} energy transfer was observed. The highest ET efficiency of $\text{Ce}^{3+}-\text{Sm}^{3+}$ is 55.8%. Based on Inokuti-Hirayama formula, the ET type of Ce^{3+} to Sm^{3+} was supposed to be dipole-dipole interaction. The critical distance of Ce^{3+} to Sm^{3+} was calculated to be about 0.55 nm.

Key words: Ca_2SiO_4 ; energy transfer; Inokuti-Hirayama formula; phosphors.

1 引 言

近年来,白光 LED 因其在固态照明领域内潜

在的巨大应用价值而受到广泛的关注^[1-3]。目前,最主要的一种获得白光的手段是在蓝光 LED 芯片上涂敷发射黄光的 $\text{YAG} : \text{Ce}^{3+}$ 荧光粉^[4]。

收稿日期: 2013-05-20; 修订日期: 2013-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(10834006, 10774141, 10904141, 10904140); 国家科技部项目(2006CB601104); 吉林省科技发展计划(20090134, 20090524); 中国科学院创新项目资助

作者简介: 林剑(1989-),男,湖南长沙人,主要从事稀土发光材料的研究。

E-mail: linsowd@gmail.com, Tel: (0431) 86708875

YAG: Ce³⁺ 中的 Ce³⁺ 能有效吸收蓝光而发射出黄光,这一光子的下转换是通过 Ce³⁺ 的 5d-4f 跃迁实现的^[4]。然而,因为蓝光混合黄光的光谱中缺乏红光成分而导致蓝光芯片 + YAG: Ce³⁺ 的组合方案存在着显色指数低(通常 < 80)和色温高(> 5 000 K)的缺点^[5]。这一缺陷使其在一些对发光要求较高,如建筑学和医学等领域的应用受到限制。对于 YAG: Ce³⁺ 以及其他 Ce³⁺ 掺杂的荧光粉来说,通过能量传递来增强红光成分是解决红光成分缺乏的一种有效手段。作为一种高效的敏化离子,Ce³⁺ 向 Eu²⁺、Mn²⁺ 以及 Pr³⁺ 的能量传递现象以及能量传递机制已经得到了比较透彻的研究^[6-8]。然而,Ce³⁺-Sm³⁺ 之间有效的能量传递却少见报道。碱土硅酸盐是一种比较传统的荧光材料,这一类材料有良好的化学和热稳定性。多种稀土掺杂的碱土硅酸盐已经由其他研究人员报道过,例如:(Ca,Sr,Ba)₂SiO₄:Eu²⁺^[9]、(Sr,Ba)₂SiO₄:Eu²⁺,Tb³⁺^[10]、Sr₂SiO₄:Eu²⁺,Ce³⁺^[11]、Ca₂SiO₄:Eu³⁺^[12] 和 Ca₂SiO₄:Dy³⁺^[13]。但 Ce³⁺、Sm³⁺ 共掺的 Ca₂SiO₄ 的发光性质以及能量传递的分析还未见报道。

本文采用高温固相法合成了 Ce³⁺、Sm³⁺ 共掺的 Ca₂SiO₄ 荧光粉,研究了其发光性质以及能量传递机制。通过 Ce³⁺-Sm³⁺ 之间的能量传递来增强光谱的红光成分,为白光 LED 的开发提供了新思路。Ce³⁺-Sm³⁺ 之间能量传递的分析更为下一步基于能量传递的以 Sm³⁺ 作为红光成分的荧光粉的研制提供了理论上的指导。

2 实 验

2.1 材料制备

采用高温固相法合成了一系列 Ca₂SiO₄:Ce³⁺,Sm³⁺,Li⁺ 样品。实验所用的原料为分析纯(>99.9%)CaCO₃、SiO₂、Li₂CO₃、光谱纯(>99.99%)CeO₂ 和 Sm₂O₃。另外,加入质量分数为 3% 的 CaF₂ 作为助熔剂。按化学计量比称取相应的原料,然后在玛瑙研钵中充分研磨。研磨后的样品先在 900 °C 空气气氛下预烧 2 h,自然冷却后再研磨均匀,然后置于高温管式炉中,在 5% H₂ + 95% N₂ 的还原气氛下,缓慢升温至 1 300 °C 恒温 6 h,自然冷却后研磨即得到所需样品。所有样品均选择 Li⁺ 作为电荷平衡剂。

2.2 样品表征

采用德国 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射仪对样品进行结构分析(辐射源为 Cu 靶 K α 射线 $\lambda = 0.154\ 05\ \text{nm}$,电压为 40 kV,电流为 40 mA,扫描步长为 0.02°)。样品激发(PLE)和发射(PL)光谱的测量采用英国爱丁堡公司的 FL920 稳态光谱仪,激发光源是 450 W 氙灯。铈离子荧光寿命用时间分辨率为 2 ns 的 FL920 瞬态光谱仪测得。所有测量都在室温下进行。

3 结果与讨论

3.1 XRD 结果分析

图 1(d) 为标准卡片 PDF33-0302 图谱,图 1(a,b,c) 是 3 个代表性样品的 XRD 图谱。如图所示,不同离子掺杂的样品的 XRD 图谱彼此相似,衍射峰的位置以及强度都与图 1(d) 相吻合,而且没有任何其他的杂相。其他样品的 XRD 结果也与所示结果类似,说明所合成的样品都为纯相 β -Ca₂SiO₄。根据 PDF 卡片 JCPDS 33-0302, β -Ca₂SiO₄ 属于单斜晶系,具有 $P21/n$ 空间点群,晶格常数分别为 $a = 0.550\ 51(3)\ \text{nm}$, $b = 0.675\ 51(3)\ \text{nm}$, $c = 0.931\ 08(5)\ \text{nm}$, $V = 0.345\ 2\ \text{nm}^3$, $Z = 4$ ^[14]。基质中有两种阳离子,其离子半径分别为 100 pm(Ca²⁺)和 40 pm(Si⁴⁺)。从离子半径的角度考虑,Ce³⁺ 以及 Sm³⁺ 应该取代晶格中 Ca²⁺ 的格位。

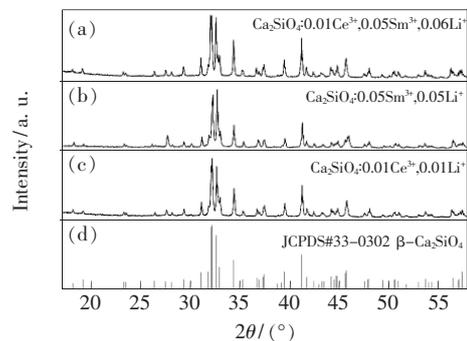


图 1 样品 Ca₂SiO₄:0.01Ce³⁺, x Sm³⁺, $(0.01+x)$ Li⁺ 的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of Ca₂SiO₄:0.01Ce³⁺, x Sm³⁺, $(0.01+x)$ Li⁺ phosphors

3.2 荧光光谱分析

图 2(a) 给出的是样品 Ca₂SiO₄:0.01Ce³⁺,0.01Li⁺ 的激发和发射光谱。在 360 nm 紫外光激发下,样品的发射光谱是范围在 375 ~ 550 nm、峰

值位于 440 nm 的宽带发射带,这一发射光谱对应 Ce³⁺ 的 5d-4f 跃迁发射。理论计算表明,Ce³⁺ 离子从 5d 激发态跃迁到 4f 的²F_{7/2}和²F_{5/2}所发光的能量差大约为 2 000 cm⁻¹[15]。对图 2(a)所示的发射光谱进行高斯拟合,得到该光谱由两个分别位于 417 nm(23 980 cm⁻¹)和 453 nm(22 075 cm⁻¹)的光谱组成。这两个光谱之间的能量差为 1 905 cm⁻¹,这一结果和理论计算值十分接近。图 2(b)表示的是样品 Ca₂SiO₄:0.02Sm³⁺,0.02Li⁺的激发和发射光谱。由图可知,样品的激发光谱是由一系列分别位于 345 nm(⁶H_{5/2}→⁴D_{7/2})、362 nm(⁶H_{5/2}→⁴D_{5/2})、377 nm(⁶H_{5/2}→⁶P_{7/2})、405 nm(⁶H_{5/2}→⁶P_{3/2})和 475 nm(⁶H_{5/2}→⁴I₄,⁴G)的锐线谱组成。在这些激发峰中,405 nm 处的激发强度明显强于其他谱线。图 2(b)的右半部分为 Ca₂SiO₄:0.02Sm³⁺,0.02Li⁺在 360 nm 激发下的发射光谱。不论是 405 nm 还是 360 nm 激发,除了发射谱强度上的差异,光谱形状都相似,这一差异与激发谱强度分布相一致。Sm³⁺的发射谱由分别位于 564,601,648,708 nm 的 4 个谱带组成,这 4 个谱带分别对应 Sm³⁺ 激发态⁴G_{5/2}到⁶H_{5/2}、⁶H_{7/2}、⁶H_{9/2}以及⁶H_{11/2} 4 个基态的跃迁。通过对比图 2(a)中 Ce³⁺的发射谱及图 2(b)中 Sm³⁺的激发谱可发现,两个光谱存在较为明显的交叠,因此 Ce³⁺→Sm³⁺能量传递有可能发生。图 2(c)表示 Ce³⁺、Sm³⁺共掺 Ca₂SiO₄的激发和发射光谱。当激发波长为 360 nm 时,可以看出发射光谱由 Ce³⁺的宽带发射及 Sm³⁺的一系列发射带组

成。虽然 Sm³⁺单掺以及 Ce³⁺、Sm³⁺共掺的 Ca₂SiO₄中 Sm³⁺发射谱的光谱形状相同,但从强度上来说,后者比前者强 10 倍左右。由此可以证明:Ce³⁺的掺入可以在很大程度上增强 Sm³⁺的发射。监测 Sm³⁺的 601 nm 发射,可以得到如图 2(c)左半部分所示的激发光谱。该激发光谱是由 Ce³⁺的宽激发带及 Sm³⁺的一系列激发峰组成的。因为 Ca₂SiO₄:Ce³⁺在 601 nm 没有发射,所以这一激发谱说明在 Ca₂SiO₄:Ce³⁺,Sm³⁺,Li⁺中存在着 Ce³⁺向 Sm³⁺的能量传递。

为研究不同 Sm³⁺掺杂浓度下 Ca₂SiO₄:Ce³⁺,Sm³⁺,Li⁺的发光性质,我们合成了 Sm³⁺摩尔分数分别为 0.5%,1%,2%,3%,4%,5%的 6 个样品。该系列样品在 360 nm 激发下的发光光谱如图 3 所示。随着 Sm³⁺摩尔分数的升高,Ce³⁺的发光逐渐减弱,Sm³⁺的红光发射则在 Sm³⁺摩尔分数为 2% 时达到最强,之后随着 Sm³⁺摩尔分数的进一步增加,Sm³⁺的发光也开始逐步减弱。在我们合成的单掺 Sm³⁺的一系列样品中,Sm³⁺发射最强时的摩尔分数也为 2%,表明 Sm³⁺在 Ca₂SiO₄中的摩尔分数超过 2% 时发生浓度猝灭。图 3 的插图显示的是随着 Sm³⁺摩尔分数的变化,Ce³⁺的 440 nm 以及 Sm³⁺的 601 nm 发光强度的变化曲线。由图 3 的一系列发射光谱算出的各个样品的色坐标如表 1 所示。从表中可以看出,Ce³⁺、

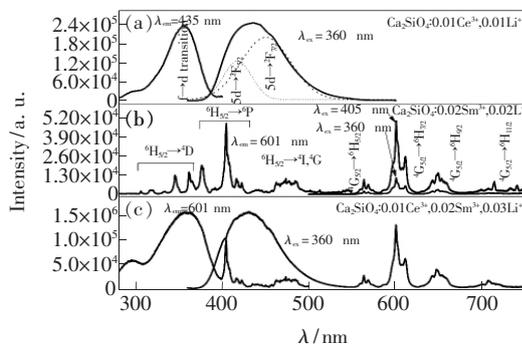


图 2 样品 Ca₂SiO₄:0.01Ce³⁺,0.01Li⁺(a)、Ca₂SiO₄:0.02Sm³⁺,0.02Li⁺(b)和 Ca₂SiO₄:0.01Ce³⁺,0.02Sm³⁺,0.03Li⁺(c)的激发和发射光谱。

Fig. 2 PL and PLE spectra of Ca₂SiO₄:0.01Ce³⁺,0.01Li⁺(a),Ca₂SiO₄:0.02Sm³⁺,0.02Li⁺(b),and Ca₂SiO₄:0.01Ce³⁺,0.02Sm³⁺,0.03Li⁺(c).

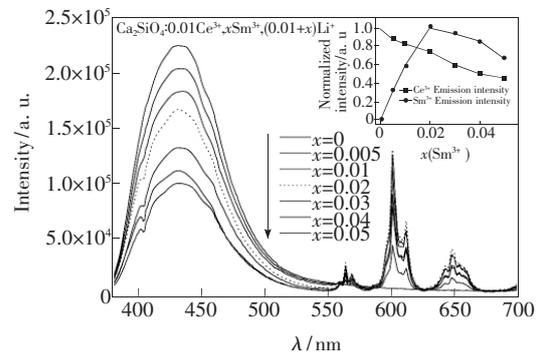


图 3 样品 Ca₂SiO₄:0.01Ce³⁺,xSm³⁺, (0.01+x) Li⁺ (x=0~0.05)在 360 nm 紫外光激发下的发射光谱,插图表示随着 Sm³⁺摩尔分数变化的 Ce³⁺和 Sm³⁺发光强度的变化曲线。

Fig. 3 PL spectra of Ce³⁺ and Sm³⁺ in Ca₂SiO₄:0.01Ce³⁺,xSm³⁺, (0.01+x) Li⁺ (x=0~0.05) upon 360 nm excitation. The inset is the dependence of the peak intensity of Ce³⁺ and Sm³⁺ emission on Sm³⁺ mole fraction(x).

Sm³⁺ 共掺的 Ca₂SiO₄ 的色坐标范围为从蓝光的 (0.16, 0.06) 到蓝紫光的 (0.24, 0.12)。由色度学知识可知, 这种发光混合黄绿光可实现白光发射, 因此, 这一系列样品在紫外激发的白光 LED 领域有着潜在的应用价值。

表 1 360 nm 激发下的 Ca₂SiO₄: 0.01Ce³⁺, xSm³⁺, (0.01+x) Li⁺ 样品的 CIE 坐标

Table 1 CIE coordinates of Ca₂SiO₄: 0.01Ce³⁺, xSm³⁺, (0.01+x) Li⁺ under 360 nm excitation

Sample	CIE coordinates (x, y)
Ca ₂ SiO ₄ :0.01Ce ³⁺	(0.16, 0.06)
Ca ₂ SiO ₄ :0.01Ce ³⁺ , 0.005Sm ³⁺	(0.18, 0.08)
Ca ₂ SiO ₄ :0.01Ce ³⁺ , 0.01Sm ³⁺	(0.20, 0.10)
Ca ₂ SiO ₄ :0.01Ce ³⁺ , 0.02Sm ³⁺	(0.22, 0.11)
Ca ₂ SiO ₄ :0.01Ce ³⁺ , 0.03Sm ³⁺	(0.24, 0.12)
Ca ₂ SiO ₄ :0.01Ce ³⁺ , 0.04Sm ³⁺	(0.25, 0.12)
Ca ₂ SiO ₄ :0.01Ce ³⁺ , 0.05Sm ³⁺	(0.24, 0.12)

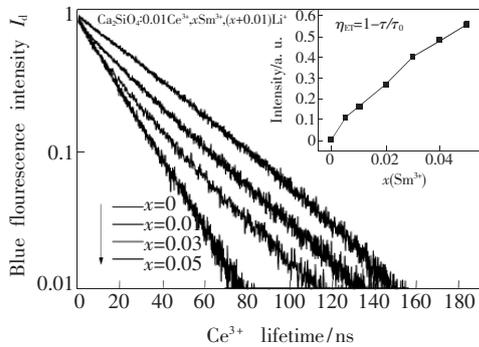


图 4 样品 Ca₂SiO₄: 0.01Ce³⁺, xSm³⁺, (0.01+x) Li⁺ (x=0~0.05) 的 Ce³⁺ 蓝光衰减曲线随着 Sm³⁺ 摩尔分数变化的函数关系。插图表示的是随着 Sm³⁺ 摩尔分数变化的 Ce³⁺-Sm³⁺ 能量传递效率的变化关系。

Fig. 4 Ce³⁺ blue light fluorescence decay of series of Ca₂SiO₄: 0.01Ce³⁺, xSm³⁺, (0.01+x) Li⁺ (x=0~0.05) as a function of Sm³⁺ mole fraction. The inset shows the ET efficiency dependent on Sm³⁺ mole fraction.

3.3 Ce³⁺, Sm³⁺ 能量传递机制分析

图 4 表示的是不同 Sm³⁺ 掺杂摩尔分数下的 Ca₂SiO₄: Ce³⁺, Sm³⁺ 样品的 Ce³⁺ 发光衰减曲线。从图中可以看出, 随着 Sm³⁺ 摩尔分数的升高, Ce³⁺ 的衰减明显变快, 说明其寿命随着 Sm³⁺ 摩尔分数的升高有明显的缩短。根据 Ce³⁺ 的寿命, Ce³⁺-Sm³⁺ 能量传递的效率可由下式算出:

$$\eta_T = 1 - \frac{\tau_d}{\tau_{d0}}, \quad (1)$$

式中 τ_{d0} 和 τ_d 分别对应 Ce³⁺ 单掺以及 Ce³⁺, Sm³⁺ 共掺的 Ca₂SiO₄ 中 Ce³⁺ 的寿命。传递效率的计算结果如图 4 插图所示。当 Sm³⁺ 的摩尔分数为 5% 时, 能量传递的效率能达到 55.81%。当 Sm³⁺ 的红光发射达到最强, 即 Sm³⁺ 摩尔分数为 2% 时, 能量传递的效率为 26.73%。

在 Ce³⁺-Sm³⁺ 能量传递中, Ce³⁺ 的发光强度衰减曲线可以用下式表示:

$$I_d(t) = I_{d0}(t)f(t), \quad (2)$$

式中 $I_{d0}(t)$ 是 Ce³⁺ 单掺样品中 Ce³⁺ 的衰减函数, $f(t)$ 表征因向 Sm³⁺ 的能量传递而失去的处于激发态的 Ce³⁺。

根据 Inokuti-Hirayama 公式^[16], 如果能量施主和能量受主之间的能量传递速率与施主-受主间距离 r 的幂函数成反比, 用 α/r^m 表示, 其中 α 是能量传递中的一个速率常数, 可得 $f(t)$ 的表达式如下:

$$f(t) = \exp\left\{\left[-\frac{4}{3}\pi\Gamma\left(1-\frac{m}{3}\right)\right]n_A\alpha^{\frac{3}{m}}t^{\frac{3}{m}}\right\}, \quad (3)$$

式中 $m=6, 8, 10$ 分别对应于电偶极-电偶极相互作用、电偶极-电四极相互作用以及电四极-电四极相互作用的系数, n_A 是单位体积内的能量受主个数。由公式 (2) 和 (3) 可知, $\lg\{\ln[1/f(t)]\}$ 与 $\lg(t)$ 有着斜率为 $3/m$ 的线性关系。图 5 为样品 Ca₂SiO₄: 0.01Ce³⁺, 0.01Sm³⁺, 0.02Li⁺ 的 $\ln[1/f(t)]$ 与 t 分别求对数后的函数曲线图。从图中可知

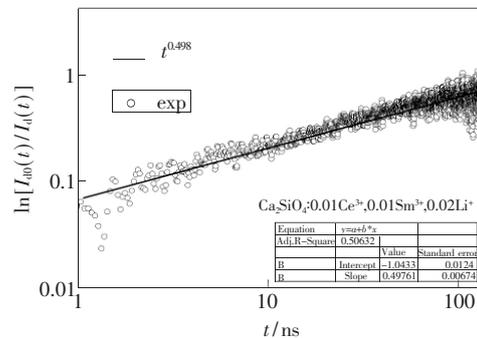


图 5 样品 Ca₂SiO₄: 0.01Ce³⁺, 0.01Sm³⁺, 0.02Li⁺ 的 $\ln[I_{d0}(t)/I_d(t)]$ vs. t 的对数-对数关系。实线表示拟合结果。图中表格表示各拟合参数。

Fig. 5 lg-lg plot of $\ln[I_{d0}(t)/I_d(t)]$ vs. t for sample Ca₂SiO₄: 0.01Ce³⁺, 0.01Sm³⁺, 0.02Li⁺. The solid line indicates the fitting behaviors. The inset table shows the fitting parameters.

$\lg\{\ln [1/f(t)]\}$ 与 $\lg(t)$ 基本呈线性关系,所得斜率为 0.498,这一结果表明代表斜率的关系式 $3/m$ 中的 m 应取 6,由此证明 $\text{Ce}^{3+}-\text{Sm}^{3+}$ 的能量传递作用类型为电偶极-电偶极相互作用。

对于电偶极-电偶极相互作用, $\text{Ce}^{3+}-\text{Sm}^{3+}$ 之间的能量传递临界距离可以由光谱交叠方法算出:

$$R_C^6 = 0.63 \times 10^{28} \frac{Q_A}{E^4} \int F_S(E) F_A(E) dE, \quad (4)$$

式中 $Q_A = 4.8 \times 10^{-6} f_d$ 表示 Sm^{3+} 的吸收截面; $f_d \approx 10^{-6}$ 是 Sm^{3+} 的电偶极振荡强度,表示 Ce^{3+} 的发射光谱与 Sm^{3+} 的激发光谱的能量积分面积归一化后的光谱交叠部分的积分,算得该数值为 1.084 eV^{-1} ; $E(\text{eV})$ 是激发和发射光谱交叠部分最短波长光子对应的能量,在 $\text{Ca}_2\text{SiO}_4:\text{Ce}^{3+},\text{Sm}^{3+}$ 中这一数值为 3.35 eV 。最终算得 Ca_2SiO_4 中的 $\text{Ce}^{3+}-\text{Sm}^{3+}$ 能量传递的临界距离约为 0.55 nm 。

4 结 论

采用高温固相法合成了一系列适用于紫外激发可调的荧光粉: $\text{Ca}_2\text{SiO}_4:0.01\text{Ce}^{3+},x\text{Sm}^{3+},(0.01+x)\text{Li}^+(x=0\sim 0.05)$ 。在 360 nm 紫外光激发下,随着 Sm^{3+} 摩尔分数的增加,样品发光从蓝色 ($0.16,0.06$) 到蓝紫色 ($0.25,0.12$) 可调。由 $\text{Ce}^{3+},\text{Sm}^{3+}$ 共掺 Ca_2SiO_4 样品的激发和发射光谱以及 Ce^{3+} 发光的衰减曲线得出, Ce^{3+} 向 Sm^{3+} 有着比较有效的能量传递。其最高能量传递效率可达到 55.8% 。根据 Inokuti-Hirayama 模型,分析得出 $\text{Ce}^{3+}-\text{Sm}^{3+}$ 能量传递类型为电偶极-电偶极相互作用。能量传递的临界距离为 0.55 nm 。若将 $\text{Ce}^{3+},\text{Sm}^{3+}$ 共掺 Ca_2SiO_4 荧光粉与发黄绿光荧光粉混合,则有望在紫外激发下获得纯正白光。通过 $\text{Ce}^{3+}-\text{Sm}^{3+}$ 能量传递来实现红光发光为白光 LED 的研制和开发提供了新思路。

参 考 文 献:

- [1] Nakamura S, Mukai T, Senoh M. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64(13): 1687-1689.
- [2] Schubert E F, Kim J K. Solid-state light sources getting smart [J]. *Science*, 2005, 308: 1274-1278.
- [3] Zhang J H, Lyu W, Hao Z D, et al. Color-tunable white-light emitting $\text{BaMg}_2\text{Al}_6\text{Si}_9\text{O}_{30}:\text{Eu}^{2+},\text{Tb}^{3+},\text{Mn}^{2+}$ phosphors via energy transfer [J]. *Chin. Opt. (中国光学)*, 2012, 5(3): 203-208 (in Chinese).
- [4] Wang L, Zhang X, Hao Z D, et al. Interionic energy transfer in $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+},\text{Pr}^{3+}$ phosphor [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 108(9): 093515-1-10.
- [5] Uchida Y, Taguchi T. Lighting theory and luminous characteristics of white light-emitting diodes [J]. *Opt. Eng.*, 2005, 44(12): 124003-1-9.
- [6] Xu X H, Wang Y H, Yu X, et al. Investigation of Ce-Mn energy transfer in $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+},\text{Mn}^{2+}$ [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2011, 94(1): 160-163.
- [7] Chen L, Luo A, Zhang Y, et al. Optimization of the single-phased white phosphor of $\text{Li}_2\text{SrSiO}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Ce}^{3+}$ for light-emitting diodes by using the combinatorial approach assisted with the taguchi method [J]. *Comb. Sci.*, 2012, 14: 636-644.
- [8] Jang H S, Im W B, Lee D C, et al. Enhancement of red spectral emission intensity of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ phosphor via Pr co-doping and Tb substitution for the application to white LEDs [J]. *J. Lumin.*, 2007, 126: 371-377.
- [9] Kim J S, Park Y H, Kim S M, et al. Temperature-dependent emission spectra of $M_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ ($M = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$) phosphors for green and greenish white LEDs [J]. *Solid State Commun.*, 2005, 133: 455-488.
- [10] Hiramatsu R, Ishida K, Fukuda Y, et al. Tb^{3+} luminescence by energy transfer from Eu^{2+} in $(\text{Sr},\text{Ba})_2\text{SiO}_4$ phosphor [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, 106(9): 093513-1-7.
- [11] Lakshminarasimhan N, Varadaraju U V. White-light generation in $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Ce}^{3+}$ under near-UV excitation [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2005, 152(9): 152-156.
- [12] Yu Q M, Liu Y F, Wu S, et al. Luminescent properties of $\text{Ca}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{3+}$ red phosphor for trichromatic white light emitting diodes [J]. *J. Rare Earths*, 2008, 26(6): 783-786.
- [13] Li P L, Zhang Z C, Zhang K, et al. Effect of charge compensation on emission spectrum of $\text{Ca}_2\text{SiO}_4:\text{Dy}^{3+}$ phosphor [J].

Chin. Opt. Lett., 2008, 6(4): 274-275.

- [14] Yamnova N A, Zubkova N V, Eremin N N, *et al.* Crystal structure of larnite β - Ca_2SiO_4 and specific features of polymorphic transitions in dicalcium orthosilicate [J]. *Crystallography Reports*, 2011, 56(2): 235-245.
- [15] Duan C J, Zhang Z J, Rösler S, *et al.* Preparation, characterization, and photoluminescence properties of Tb^{3+} -, Ce^{3+} -, and $\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ -activated $\text{RE}_2\text{Si}_4\text{N}_6\text{C}$ ($\text{RE} = \text{Lu}, \text{Y}, \text{and Gd}$) phosphors [J]. *Chem. Mater.*, 2011, 23(7): 1851-1861.
- [16] Inokuti M, Hirayama F. Influence of energy transfer by the exchange mechanism on donor luminescence [J]. *J. Chem. Phys.*, 1978, 43(6): 1978-1989.
- [17] Dexter D L. A theory of sensitized luminescence in solids [J]. *J. Chem. Phys.*, 1953, 21(5): 836-850.



《中国光学》征稿启事

《中国光学》,双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN22-1400/04; 国内外公开发行人, 邮发代号: 国内 12-140 国外 BM6782。

- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国学术期刊(光盘版)源期刊
- ★ 万方数字化期刊全文数据库源期刊
- ★ 中国科技期刊数据库源期刊
- ★ 荷兰 Scopus 数据库源期刊
- ★ 美国《化学文摘》(CA) 源期刊
- ★ 美国乌利希国际期刊指南(Ulrich LPD) 源期刊
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 源期刊
- ★ 波兰《哥白尼索引》(IC) 源期刊

报道内容: 基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

发稿类型: 学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿, 洽谈合作。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版: 《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://www.chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn zgxcn@126.com

联系电话: (0431) 86176852; (0431) 84627061 传 真: (0431) 84613409

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)

《中国光学》编辑部