

# First-Principles Study on the Luminescence Properties of $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$

Xiao Wu<sup>1,\*</sup>, Zhijie Li<sup>2</sup>, Yufeng Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, China

<sup>2</sup>School of Science, Shenyang University of Technology, Shenyang, China

## Email address:

tim55824@sina.com (Xiao Wu), ZJLi@imr.ac.cn (Zhijie Li), qingdao Zhangyufeng@163.com (Yufeng Zhang)

## To cite this article:

Xiao Wu, Zhijie Li, Yufeng Zhang. First-Principles Study on the Luminescence Properties of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ . *International Journal of Materials Science and Applications*. Vol. 4, No. 6, 2015, pp. 385-389. doi: 10.11648/j.ijmsa.20150406.13

**Abstract:** In order to improve  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  luminescent properties, explore  $\text{Eu}^{2+}$  and  $\text{Dy}^{3+}$  in  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ , using a plane-wave ultrasoft pseudopotential method under the density functional theory framework, were established  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$  and  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  supercell model, and calculated their population numbers, band structure and density of states. The results showed that: the luminescence center  $\text{Eu}^{2+}$  doping  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  makes impurity level appearing in the forbidden band and the conduction band, and produce photoluminescence effect. On this basis, the auxiliary activator  $\text{Dy}^{3+}$  doping makes the luminous intensity higher, persistence time longer.

**Keywords:** First Principles,  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ , Band Structures, Density of States, Luminescence Properties

## $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 发光性质的第一性原理研究

吴霄<sup>1,\*</sup>, 李志杰<sup>2</sup>, 张玉峰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>材料科学与工程学院, 沈阳工业大学, 沈阳市, 中国

<sup>2</sup>理学院, 沈阳工业大学, 沈阳市, 中国

## 邮箱

tim55824@sina.com (吴霄), ZJLi@imr.ac.cn (李志杰), qingdao Zhangyufeng@163.com (张玉峰)

**摘要:** 为了提高 $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 的发光性能, 探究 $\text{Eu}^{2+}$ 和 $\text{Dy}^{3+}$ 在 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 中的作用, 本文采用密度泛函理论框架下的平面波超软赝势方法, 分别建立了 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 、 $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$ 和 $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 超胞模型, 并计算了它们的布居数、能带结构和态密度。结果表明: 发光中心 $\text{Eu}^{2+}$ 的掺杂使 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 的禁带和导带中出现杂质能级, 并因此产生光致发光效应; 在此基础上辅助激活剂 $\text{Dy}^{3+}$ 的掺杂使得发光强度更高, 余辉时间更长。

**关键词:** 第一性原理,  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ , 能带结构, 态密度, 发光性质

## 1. 引言

自20世纪60年代 $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$ 的余辉现象被发现[1]以来, 长余辉发光材料得到了人们广泛的关注[2-5]。1996年, 日本学者Matsuzawa首次发现辅助激活剂Dy的掺杂, 可大大增强铝酸锶的发光强度和余辉时间。在长余辉发光材料中, 铝酸盐长余辉发光材料的开发在长余辉发光材料

史上具有里程碑的意义[6-9]。铝酸锶是应用广泛的基质材料, 它具有很宽的带隙和良好的化学稳定性。例如, 掺杂稀土元素的铝酸锶长余辉发光材料具有发光亮度高, 余辉时间长、稳定性好、无毒无害、生产工艺简单、成本低等优势, 在生物传感、塑料、涂料、玻璃、纺织等工业有着广泛的应用[10-14]。

近些年来, 为了得到具有良好余辉特性的长余辉发光材料, 关于铝酸锶的研究越来越多[15-18]。栾林等研究了不同锶铝比例对铝酸锶长余辉发光材料性能的影响[19]; 徐超等研究了稀土掺杂铝酸锶长余辉材料陷阱类型及发光机理[20]; 王宝树等研究了铝酸锶长余辉材料的制备工艺和光谱性质[21]。众多研究表明, 在铝酸锶中掺杂稀土元素Eu能够产生光致发光效应, 在此基础上掺杂稀土元素Dy能够是这种发光效应的发光强度更高, 余辉时间更长, 但是对发光机理的研究还不完善。研究铝酸锶长余辉发光材料的发光机理对改善其发光性能尤为重要。本文采用基于密度泛函理论的平面波赝势方法分别对 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 、 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ : $\text{Eu}^{2+}$ 和 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ : $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ 的结构进行优化, 并在此基础上计算了其布居数、能带结构和态密度, 对铝酸锶长余辉发光材料发光机理的研究有着理论指导的作用。

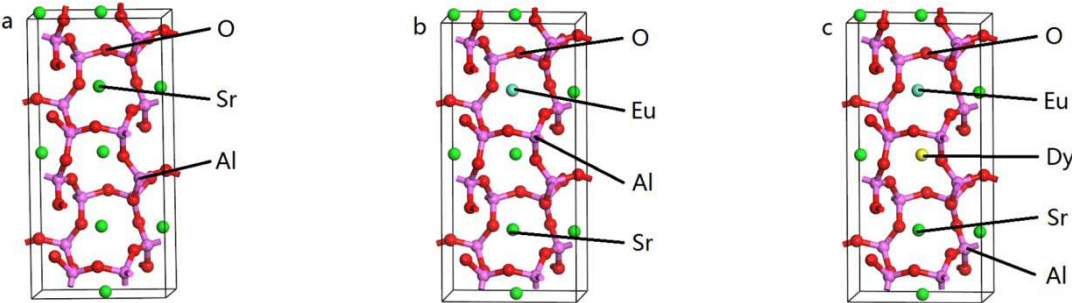


图1 原胞结构分别对应 a)  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ , b)  $\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ , c)  $\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ 。

2.2. 计算方法

本文采用Material Studio 7.0软件包中的CASTEP模块对上述模型进行了密度泛函理论计算, 采用GGA-PBE方法, 结合总能量平面波赝势法中的超软赝势对各个模型结构优化, 并计算了它们的布居数、能带结构和态密度。其中, 结构优化采用的是BFGS方法, 能量积分在倒易空间中进行, 平面波截断能为390eV, 自洽收敛精度为 $2.0 \times 10^{-5}$  eV/atom, 作用在每个原子上的力最大为0.5eV/nm, 内应力最大为0.1GPa, 公差偏移为 $2.0 \times 10^{-4}$  nm。上述模型在计算时都采用了自旋极化,  $\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ 模型采用了正式的初始自旋,  $\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ 模型中掺杂的三价Dy替代了二价Sr, 电荷因子设置为了-1。计算时使用的价电子构型为O  $2s^2 2p^4$ , Al  $3s^2 3p^1$ , Sr  $5s^2$ , Eu  $4f^7 5d^0 6s^2$ , Dy  $4f^{10} 5d^0 6s^2$ , 布里渊区积分采用Monkorst-Park方案, 在布里渊区选取的k点是 $2 \times 1 \times 3$ 。先对这三种模型用上述的方法结构优化, 再对各个模型的布居数, 能带结构和态密度计算分析。

3. 计算结果与讨论

3.1. 结构优化

分别对上述三种模型结构优化, 使它们的系统能量最低。把实验所得 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 的晶胞参数和经过结构优化的不同掺杂比例的 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ : $\text{Eu}^{2+}$ 的晶胞参数比较分析, 如表1所示。

2. 物理模型和计算方法

2.1. 物理模型

$\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 晶体属于具有尖晶石结构的单斜晶系, 空间群为 $P2_1$ , 晶格参数 $a=0.8447\text{nm}$ ,  $b=0.8816\text{nm}$ ,  $c=0.5163\text{nm}$ ,  $\alpha=\gamma=90^\circ$ ,  $\beta=93.420^\circ$ 。 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 基质中存在 $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ 两种阳离子格位,  $[\text{AlO}_4]$ 四面体顶角相连, 形成六边环, 在六边环中 $[\text{AlO}_4]$ 四面体上下交替排列, 由于 $\text{Sr}^{2+}$ 位于六边形孔洞中, 使得 $[\text{AlO}_4]$ 四面体网状结构发生严重扭曲。在 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ : $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ 中,  $\text{Al}^{3+}$ 的半径为0.0535nm,  $\text{Sr}^{2+}$ 的半径为0.118nm,  $\text{Eu}^{2+}$ 的半径为0.117nm,  $\text{Dy}^{3+}$ 的半径为0.0912nm,  $\text{Sr}^{2+}$ 和 $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ 半径相差不大, 掺杂在晶格中的Eu和Dy替代了部分Sr。计算模型如图1所示, 分别为 $(1 \times 2 \times 1)$ 超胞 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 、 $(1 \times 2 \times 1)$ 超胞 $\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ 和 $(1 \times 2 \times 1)$ 超胞 $\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ 。

表1 晶格参数。

Species	a/nm	b/nm	c/nm	$\alpha / ^\circ$	$\beta / ^\circ$	$\gamma / ^\circ$
Experimental data	0.8447	0.8816	0.5163	90.000	93.420	90.000
$\text{SrAl}_2\text{O}_4$	0.8630	1.7978	0.5245	89.995	93.924	89.996
$\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$	0.8549	1.7885	0.5213	90.014	93.662	89.880
$\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$	0.8656	1.7803	0.5204	89.998	93.525	89.996

分析表1数据可以得知,  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 晶格参数的实验数据和理论数据非常接近,  $c/a$ 的比值误差约0.57%, 这表明本文的计算精度是可靠的。 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 模型计算值中的晶格参数要大于实验值, 这是因为实验测量的是块体, 而计算的是微小颗粒, 由于晶体表面原子所受的束缚力小, 原子间距离较远, 所以微小颗粒中的晶格参数要大于块体中的晶格参数。同时, 从表中也可得知, 晶胞体积由大到小依次为 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ , 这是由于Eu和Sr的价态一样,  $\text{Eu}^{2+}$ 的半径比 $\text{Sr}^{2+}$ 略小所致; 而三价Dy替换二价Sr, 离子半径不如价态改变对晶胞体积的贡献大, 所以Eu、Dy共掺的晶胞体积比只掺Eu的大。

3.2. 布居分析

为了讨论上述三种模型中原子间相互作用以及成键情况, 对体系中的原子电荷量和键长及其布居数计算分析, 结果分别为表2、表3所示。

表2为体系中各原子的电荷量,从中可以得知,纯的 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 中,Sr、Al、O的原子电荷分别是1.37,1.63和-1.16,都偏离了纯离子态的标准预期值(Sr、Al、O原子电荷的标准预期值分别为+2、+3和-2),这种偏离体现了Sr和O,Al和O之间的共价性。从表中还可以看出,随着Eu和Dy的掺杂,Sr、Al、O的原子电荷与纯离子态的标准预期值偏离增大,这说明Eu和Dy的掺杂使Sr和O,Al和O之间的共价性增强。

表2  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ 各原子的电荷量。

Species	Charge/e				
	Sr	Al	O	Eu	Dy
$\text{SrAl}_2\text{O}_4$	1.37	1.63	-1.16	-	-
$\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$	1.35	1.61	-1.14	1.33	-
$\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$	1.30	1.59	-1.13	1.21	0.67

表3为上述体系中的键长及其重叠布居数。键长从长到短依次为O-Eu键、O-Dy键、O-Sr键、O-Al键。从O-Al键和O-Sr键的重叠布居数中可以得出,O和Al之间的结合力大于O和Sr之间的结合力;从O-Sr键、O-Dy键和O-Eu键的重叠布居数依次增大可知,O和Sr、O和Dy及O和Eu之间结合力依次增大。

表3  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ 的键长及其重叠布居数。

Species	Bond	Population	Length/nm
$\text{SrAl}_2\text{O}_4$	O-Al	0.46	0.1779
	O-Sr	0.10	0.2665
$\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$	O-Al	0.47	0.1772
	O-Sr	0.10	0.2644
$\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$	O-Eu	0.14	0.2649
	O-Al	0.47	0.1784
	O-Sr	0.10	0.2683
	O-Eu	0.14	0.2703
	O-Dy	0.12	0.2638

### 3.3. 能带结构和态密度

图2是 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 的能带结构图和态密度图。材料的性质主要是由费米能级附近的电子结构所决定的,为了清楚地展现费米能级附近的能带结构,在 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 的能带结构图中只给出了-8~8eV的电子结构,可以看出价带顶位于D点处,而导带底位于G点处,说明 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 表现出间接半导体的性质。其带隙为3.98eV,这与实验值6.52eV相差较大,这是由于用广义梯度近似(GGA)计算晶体结构时,Sr 3d态的能量被过高的估计,使得其与O 2p态之间的相互作用增强,导致带隙偏低。本文计算分析的是铝酸锶掺杂体系的电子结构与发光性质,且计算过程中的参数一致相同。因此,尽管得到的带隙宽度的绝对值与实际有偏差,但是得到的带隙宽度变化规律是可信的。

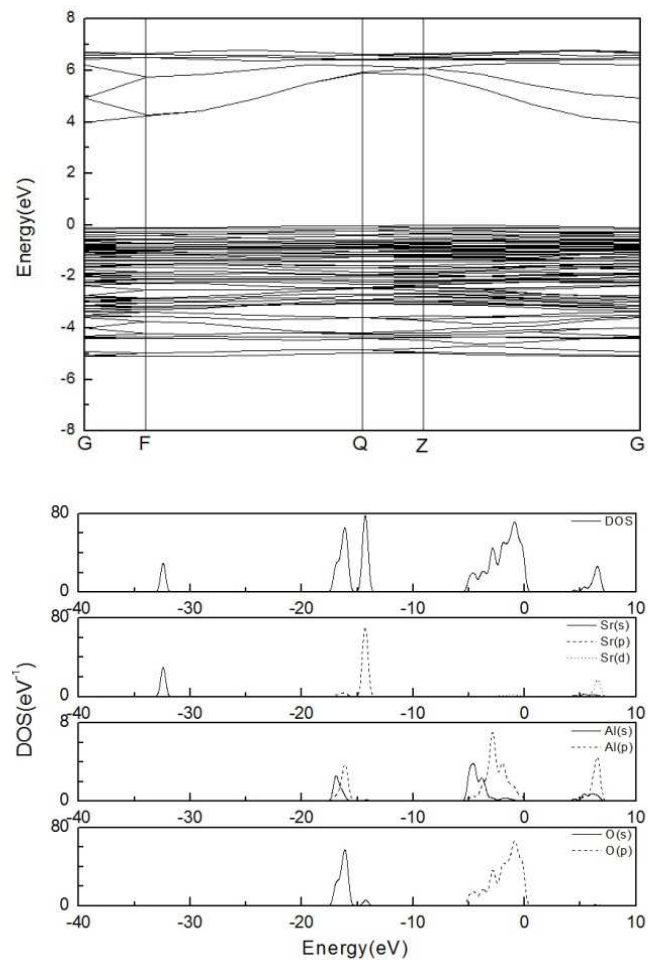
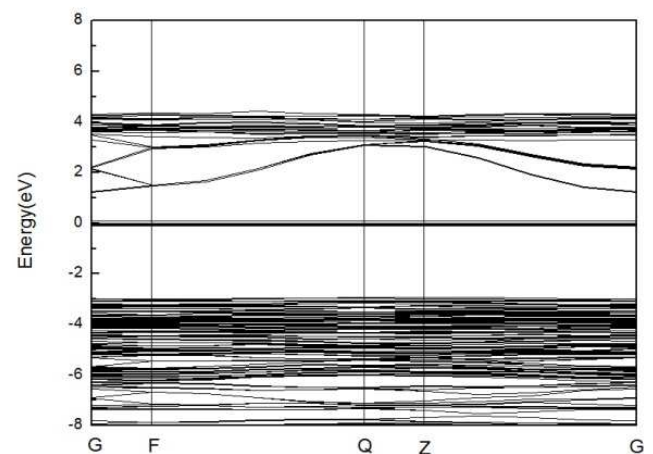


图2  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 的能带结构图和态密度图。

从图2的态密度图中可以看出, $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 在价带主要由三部分构成,-6~1eV是由O 2p轨道以及少量Al 3s, 3p轨道构成,-18~-13eV是由Sr 4p轨道、O 2s轨道以及少量Al 3s, 3p轨道构成,-33~-31eV是由Sr 5s轨道构成;在导带, $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 主要由Sr 4d轨道以及少量Al 3s, 3p轨道构成。也就是说, $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 的价带主要是由O 2p轨道所贡献,导带主要是由Sr 4d轨道所贡献。





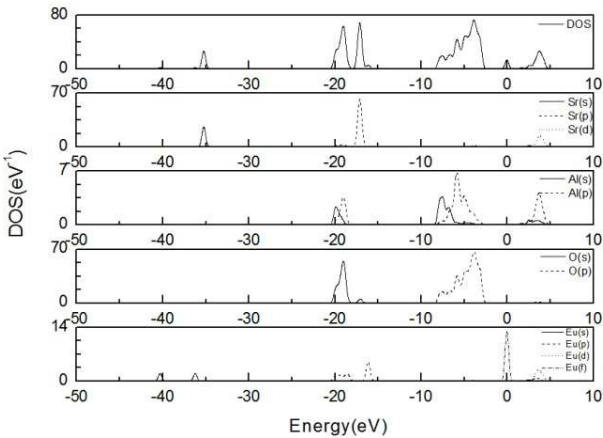


图3  $\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$  的能带结构图和态密度图。

图3为 $\text{Sr}_{0.875}\text{Eu}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ 的能带结构图和态密度图,从图中可以看出, $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 掺Eu后,费米能级上移,并在费米能级附近出现Eu 4f轨道,在导带上出现Eu的5d轨道,并且Eu的5d轨道与Sr的4d轨道之间产生杂化,使得Eu的5d轨道电子分布变广,5d轨道电子跃迁回4f轨道的概率大大增加。在掺Eu的能带结构图中,Eu 4f轨道的电子在F点处能量最高,与5d轨道能量最低点所处的位置相同,因为这两点在k空间中处于同一位置,所以电子在跃迁时只有能量变化,没有动量变化,故电子由5d轨道向4f轨道跃迁时,能量将有更大的几率以光子形式释放出来。Eu掺杂使 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 的带隙变大,这是由莫斯-布耳斯坦效应引起的。

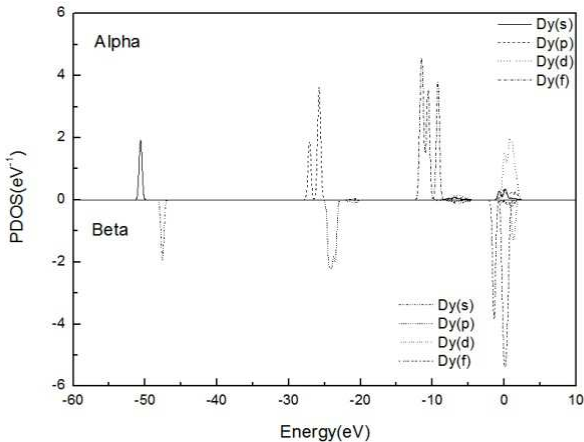
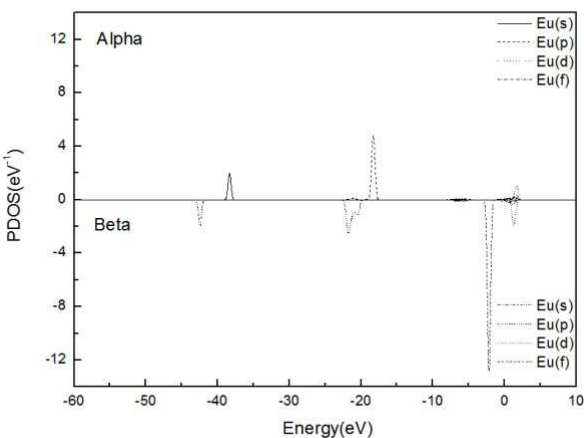
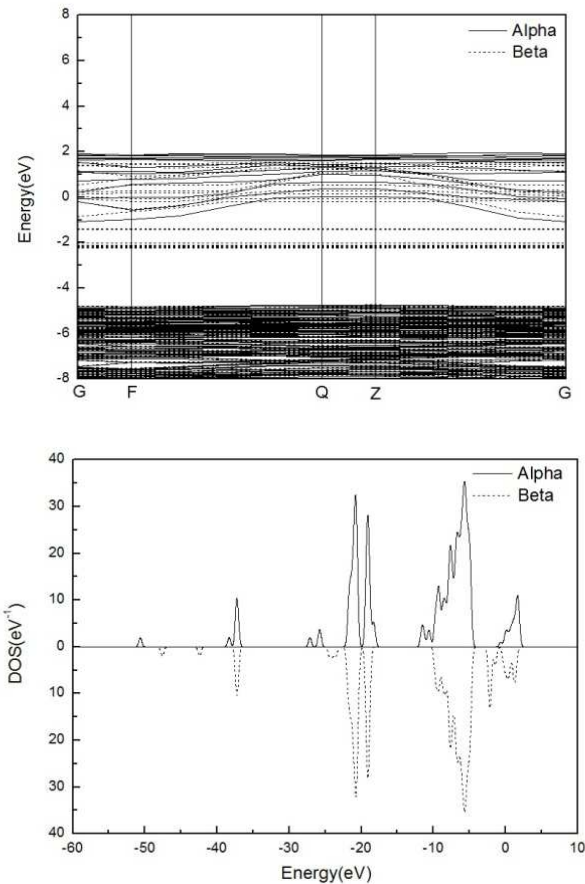


图4  $\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$  的能带结构图和态密度图。

图4为 $\text{Sr}_{0.75}\text{Eu}_{0.125}\text{Dy}_{0.125}\text{Al}_2\text{O}_4$ 的能带结构图和态密度图,计算时由于 $\text{Dy}^{3+}$ 替换 $\text{Sr}^{2+}$ ,电荷因子为-1,态密度分裂为上旋和下旋两部分。从图4 Eu和Dy的分态密度图中可以看出, $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 掺Dy后,Dy 4f 5d轨道在晶体场的作用下发生分裂,费米能级进一步上移,位于Dy 4f轨道的峰值处。Eu 4f轨道的能量低于费米能级,在365nm激发源的照射下,Eu 4f轨道上的电子跃迁到Eu 5d轨道上,同时在Eu 4f轨道上产生空穴。这些空穴一部分通过热释放回到价带,另一部分被Dy 4f轨道俘获, $\text{Dy}^{3+}+\text{hole} \rightarrow \text{Dy}^{4+}$ , $\text{Dy}^{3+}$ 作为空穴陷阱有着合适的深度。当移去激发源后,这些被俘获的空穴通过热释放回到价带,并迁移回Eu 4f轨道。与此同时,由于斯托克斯位移的存在,5d轨道上的电子通过振动松弛和内转化失去部分能量,跃迁到Eu 4f轨道上,与空穴结合,发出520nm的黄绿光,再通过振动松弛进一步失去振动能量,从而达到基态。正是由于Dy的存在,大大提高了 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 的发光强度,延长了余辉时间,使得铝酸锶长余辉发光材料在各个领域都有着广泛的应用。

4. 结论

本文采用密度泛函理论框架下的平面波超软赝势方法,计算了 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 的布居数、能带结构和态密度。结果表明:Eu和Dy掺杂后的 $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 晶胞体积变小;Eu和Dy



的掺杂使Sr和O, Al和O之间的共价性增强; O和Al之间的结合力大于O和Sr之间的结合力; O和Sr, O和Dy及O和Eu之间结合力依次增大;  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 为间接半导体, 价带主要是由O 2p轨道所贡献, 导带主要是由Sr 4d轨道所贡献; 掺Eu后, 费米能级上移, 在禁带中出现Eu的4f轨道, 在导带中出现了Eu的5d轨道; Eu、Dy共掺时,  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ 的电子结构产生了很大的改变, 发光中心Eu和辅助激活剂Dy共同作用, 使得 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 具有良好的长余辉发光性能。

## 参考文献

- [1] Palilla F C, Levine A K, Tomkus M R. Fluorescent Properties of Alkaline Earth Aluminates of Type  $\text{MAl}_2\text{O}_4$  Activated by Divalent Europium[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1968, 115(6):642-644.
- [2] 刘兵, 黄建国, 刘坐镇. 稀土掺杂无机长余辉发光材料研究概况[J]. 材料导报, 2013, 27:178-182, 188.
- [3] Abbruscato V. Optical and Electrical Properties of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1971, 118(6):930-933.
- [4] Akiyama M, Xu C N, Nonaka K, et al. Intense Visible Light Emission from  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}, \text{Dy}$  [J]. Applied Physics Letters, 1998, 73(21):3046-3048.
- [5] Matsuzawa T, Aoki Y, Takeuchi N, et al. A New Long Phosphorescent Phosphor with High Brightness,  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1996, 143(8):2670-2673.
- [6] Peng X, Li S X, Liu X J, et al. Syntheses and Photoluminescence Properties of  $\text{Eu}^{2+}/\text{Tb}^{3+}$  Doped  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$  Phosphors[J]. Journal of Inorganic Materials, 2015, 30(4): 397-400.
- [7] Qin J L, Zhang H R, Lei B F, et al. Thermoluminescence and Temperature-dependent Afterglow Properties in  $\text{BaSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$  [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2013, 96(10): 3149-3154.
- [8] Zhang H R, Lei B F, Qin J L, et al. Preparation of  $\text{SrSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$  Phosphor by SrSi Alloy Precursor and Its Long-lasting Phosphorescence Properties[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2013, 96(6): 1810-1814.
- [9] Chang C K, Li W, Huang X J, et al. Photoluminescence and Afterglow Behavior of  $\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  and  $\text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$  in  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  matrix[J]. Journal of Luminescence, 2010, 130(3): 347-350.
- [10] 李许波, 黄奇书, 雷一锋, 等. 稀土铝酸盐长余辉发光材料的国内市场需求及应用现状 [J]. 材料研究与应用, 2011, 5(2):82-86.
- [11] 李群, 滕晓明, 庄卫东, 等. 稀土长余辉发光材料的研究现状和发展趋势[J]. 稀土, 2005, 26(4):62-68.
- [12] 曲艳东, 李晓杰, 陈涛, 等. 铝酸盐系长余辉发光材料的研究新进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(1):100-106.
- [13] 刘应亮, 雷炳富, 邝金勇, 等. 长余辉发光材料研究进展[J]. 无机化学学报, 2009, 25(8):1323-1329.
- [14] 张盈, 曾超, 邓家桃, 等. 新型长余辉发光材料 $\text{CaAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 的制备与发光性能研究 [J]. 人工晶体学报, 2012, 41(4):1066-1069.
- [15] 张玉军, 尹衍升.  $\text{B}_2\text{O}_3$ 对 $\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 共激活铝酸锶发光材料发光性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2003, 32(1):20-23.
- [16] 张玉军, 尹衍升.  $\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 共激活铝酸锶发光材料长余辉发光机理探讨[J]. 人工晶体学报, 2004, 33(1):67-70.
- [17] Sun W Z, Chen Y H, Wu L E, et al. Phase Composition and Luminescent Properties of Strontium Aluminate Long Persistence Phosphor Synthesized by Combustion Synthesis Method with Different Sr/Al Ratios [J]. Rare Metals, 2013, 32(4):414-419.
- [18] 邱冬, 鲁道荣, 周贱发.  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 材料发光性能的影响因素的研究[J]. 金属功能材料, 2009, 16(3):31-34.
- [19] 栾林, 郭崇峰, 黄德修. 锶铝比例对铝酸锶长余辉发光材料性能的影响[J]. 无机材料学报, 2009, 24(1):53-56.
- [20] 徐超, 卢佃清, 刘学东. 稀土掺杂铝酸锶长余辉材料陷阱类型及发光机理[J]. 稀土, 2015, 36(1):74-79.
- [21] 王宝树, 刘绍龙, 谭娜, 等. 铝酸锶长余辉材料的制备工艺改进及光谱性质[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(2):358-361.