

Mg 共掺杂 $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ 晶体快发光的作用机理

李铭清^{1,2}, 王林伟², 丁栋舟², 冯鹤¹

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 201899)

摘要: $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ (GAGG:Ce)闪烁体综合性能优异, 应用前景广阔。为加快 GAGG 的发光衰减速度, 本研究通过提拉法生长了 Mg 共掺的 $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ 单晶。测试结果显示, 随着 Mg^{2+} 掺杂浓度增加, 晶体的闪烁衰减速度加快, 光输出降低。传统解释认为, Mg^{2+} 通过电荷补偿作用将部分 Ce^{3+} 转换成 Ce^{4+} , 后者的发光速度更快。本研究尝试从缺陷的形成与抑制的角度来讨论 Mg 改善 GAGG:Ce 晶体闪烁性能的作用机理。由于 Ce 的离子半径比 Gd 大, Ce 离子掺入将导致发光中心 Ce_{Gd} 附近的晶格发生畸变。畸变结果为近邻的八面体格位空间变大, 反位缺陷将更容易在这些变大的八面体格位形成。最终每个发光中心 Ce_{Gd} 被四个反位缺陷 Gd_{Al} 包裹, 后者捕获载流子, 延缓从基体到发光中心的能量传递, 导致发光速度变慢。由于 Mg 的离子半径介于 Gd 和 Al 之间, Mg_{Al} 将更容易在上述畸变的八面体格位形成, 这会抑制反位缺陷 Gd_{Al} 在发光中心 Ce_{Gd} 附近形成(或富集), 最终降低(甚至消除)反位缺陷对发光中心的不良影响。XEL 测试结果显示, 随着 Mg 掺杂量增大, 与反位缺陷相关的发射峰强度变弱, 这可以证明 Mg 对反位缺陷有抑制作用。

关键词: 闪烁体; GAGG:Ce; 反位缺陷; 衰减时间

中图分类号: O77 文献标志码: A

Mechanism of Mg-codoping in Improving the Time Performance of $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ Scintillator

LI Mingqing^{1,2}, WANG Linwei², DING Dongzhou², FENG He¹

(1. School of Material Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China)

Abstract: With its excellent comprehensive performance, $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ (GAGG:Ce) scintillation crystal has broad application prospects. To accelerate the luminescence decay rate, Mg-codoped $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ single crystals were grown by Czochralski method. The test results show that with the concentration of Mg^{2+} increasing, the scintillation decay of the crystal accelerates and the light output decreases. The conventional interpretation suggests that Mg^{2+} could convert part of Ce^{3+} into Ce^{4+} through charge compensation, and the Ce^{4+} luminesces more quickly. This study tries to discuss the mechanism of Mg-codoping in GAGG:Ce crystals from the perspective of antisite defect. Since the ionic radius of Ce is larger than Gd, the doping of Ce ions leads to a distortion of the crystal lattice near the

收稿日期: 2021-12-29; 收到修改稿日期: 2022-02-16; 网络出版日期: 2022-07-08

基金项目: 上海科学技术委员会项目(20511107400); 国家自然科学基金(11475241)

Program of Shanghai Science and Technology Commission (20511107400); National Natural Science Foundation of China (11475241)

作者简介: 李铭清(1996-), 男, 硕士研究生. E-mail: mingqing114@foxmail.com

LI Mingqing (1996-), male, Master candidate. E-mail: mingqing114@foxmail.com

通信作者: 丁栋舟, 正高级工程师. E-mail: dongzhou_ding@mail.sic.ac.cn

DING Dongzhou, professor. E-mail: dongzhou_ding@mail.sic.ac.cn

luminescence center Ce_{Gd} . As a result of the distortion, the space of the adjacent octahedral sites become larger, and the antisite defects are more likely to form in these larger octahedral sites. Eventually each luminescence center Ce_{Gd} is surrounded by four antisite defects Gd_{Al} , which would capture carriers and delay the energy transfer from the matrix to the luminescence center. As the ionic radius of Mg is between Gd and Al, Mg_{Al} also prefers to form in those distorted octahedral sites, which inhibits the formation (or enrichment) of the antisite defect Gd_{Al} near the luminescence center Ce_{Gd} , and eventually reduces (or even eliminates) the adverse effects of the antisite defect on the luminescence center. XEL results show that with the increase of Mg concentration, the emission peak related to the antisite defect becomes weaker, which indicates that Mg could inhibit the formation of the antisite defect.

Key words: scintillator; GAGG:Ce; antisite defect; decay time

闪烁体是一种能够吸收高能射线(或粒子)同时发射紫外可见光的能量转换介质, 将其与光电转换器件耦合可以对高能射线实现有效探测, 目前已广泛应用于高能物理、油井勘探、核医学成像等领域^[1]。 $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GAGG:Ce)闪烁晶体是近几年在“带隙工程”的指导下发展起来的, 其密度大, 光输出高, 能量分辨率好, 物化性质稳定, 一经报道就受到广泛关注^[2]。目前通过提拉法已经成功制备直径 4 英寸的 GAGG 单晶, 这大大推动了 GAGG 的商用进程^[3]。然而与著名的硅酸钆镨闪烁晶体(LYSO)相比, GAGG 的闪烁衰减时间较长(~90 ns), 并且存在较强的慢分量, 这严重限制了其应用^[4]。文献[5–6]报道了通过 Li 或 Mg 共掺杂能显著缩短 GAGG 的闪烁衰减时间。研究人员对此给出的解释是: 掺入晶格的低价离子通过电荷补偿机制将部分 Ce^{3+} 转换成 Ce^{4+} , 后者可以直接捕获电子形成激发态的 $(\text{Ce}^{3+})^*$, 然后退激发光。由于跳过了 Ce^{3+} 捕获空穴形成 Ce^{4+} 这个步骤, 简化了发光过程, 所以发光速度变快^[6–7]。吸收谱测试结果证实了 Ce^{4+} 的存在, 然而还有两个现象该理论无法解释: 1) 增加 Mg^{2+} 的含量将更多的 Ce^{3+} 转换成 Ce^{4+} , 光输出会急剧降低, 直至发光消失; 2) 低价的碱金属/碱土金属离子中, 只有 Li 和 Mg 的效果最显著。

本工作通过提拉法生长了无共掺和 Mg 共掺的 GAGG:Ce 单晶, 测试了引入 Mg 对 GAGG:Ce 晶体光输出以及衰减时间的影响。从晶格缺陷的角度对 Mg 的作用机理提出新的解释。X 射线激发发射谱(XEL)测试结果可以证实本文的猜测。

1 实验方法

实验用到的晶体采用中频感应加热提拉法生长。以纯度为 99.99% 的 Gd_2O_3 、 Al_2O_3 、 Ga_2O_3 、 CeO_2 、 MgCO_3 粉末为原料, 按照化学式

$(\text{Mg}_x\text{Ce}_{0.01}\text{Gd}_{0.99-x})_3\text{Al}_{2.3}\text{Ga}_{2.7}\text{O}_{12}$ 进行配料, x 取 0、0.001、0.003。原料混合均匀后, 在 1600 °C 下烧结 15 h, 直到充分发生固相反应。烧结后的样品放入坩埚中进行熔化、生长, 生长气氛为 $\text{Ar}+2\%\text{O}_2$, 提拉速度为 0.5~2 mm/h, 转速为 5~13 r/min。生长结束后, 将晶体从熔体中移出, 缓慢冷却至室温。从晶锭中切取尺寸为 10 mm×10 mm×2 mm 的样品, 抛光处理以供测试使用。

光输出测试在 662 keV 的 γ 射线(^{137}Cs 源)激发下进行, 光电倍增管为 Hamamatsu R878, shaping time 为 0.75 μs , 样品用 Teflon 包覆。采用 Infiniium DSO9404A 型数字示波器测试闪烁衰减时间。激发谱的测试设备为 Edinburg FLS 980 型荧光光谱仪。采用日立 U-3900H 紫外分光光度计测试吸收谱, 波长范围为 200~800 nm。X 射线激发发射谱测试设备为课题组自主搭建($U=35$ kV, $I=0.1$ mA)。所有测试均在室温下进行。

2 结果与讨论

2.1 Mg 的掺杂效果

$(\text{Mg}_x\text{Ce}_{0.01}\text{Gd}_{0.99-x})_3\text{Al}_{2.3}\text{Ga}_{2.7}\text{O}_{12}$ ($x=0$ 、0.001、0.003)单晶通过提拉法生长, 所得晶体的编号分别为 Mg-0, Mg-1, Mg-3。从晶锭切取的样品呈淡黄色, 抛光处理后透明度高, 无裂纹、包裹体等宏观缺陷(图 1 所示)。Mg-0、Mg-1、Mg-3 样品在主发射峰(~550 nm)附近的透过率分别为 78.9%、73.4%、80.7%(图 2 所示)。

通过 ^{137}Cs 源激发得到 GAGG:Ce,Mg 闪烁体的多道能谱, 如图 3(a)所示。随着 Mg^{2+} 的掺杂量增加, GAGG 的光输出逐渐降低, 当 $x=0.003$ 时, 晶体光输出降至无掺杂样品的 69%。在 ^{137}Cs 源激发下, 通过数字示波器测试得到样品的闪烁衰减曲线, 如图 3(b)所示。掺杂 Mg^{2+} 显著加快了 GAGG 的发光

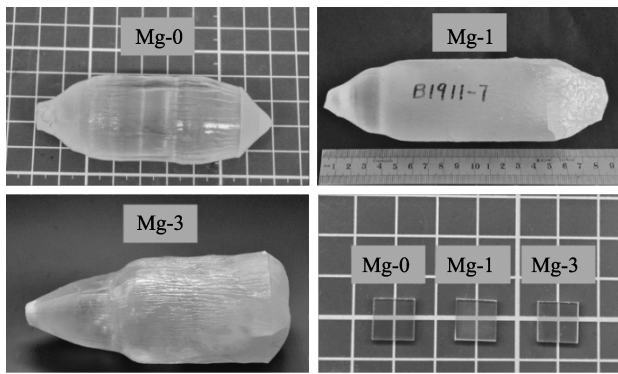


图 1 $Gd_3Al_{2.3}Ga_{2.7}O_{12}:Ce,Mg$ 晶体
Fig. 1 Photos of $Gd_3Al_{2.3}Ga_{2.7}O_{12}:Ce,Mg$ crystals

衰减速度, 通过指数拟合得到, 晶体的衰减时间常数从 128 ns 缩短到 67 ns。表 1 汇总了各样品的相对光输出以及闪烁衰减时间常数。对于 Mg^{2+} 改善 GAGG 衰减性能的作用机理, 已有的解释认为: 低价 Mg^{2+} 通过电荷补偿效应将部分 Ce^{3+} 转换成 Ce^{4+} , 后者的发光速度更快^[6-7]。

对于闪烁体发光过程的详细描述, 目前主要有两种模型(图 4 所示)。第一种模型认为: 发光中心 Ce^{3+} 先俘获一个空穴形成 Ce^{4+} , 然后再俘获一个电子形成激发态(Ce^{3+})*, 最后激发态退激发光变回 Ce^{3+} , 见图 4(a)。该模型认为 Ce^{4+} 是发光过程的一个中间态, 人为引入 Ce^{4+} 对发光是有益的。 Ce^{4+} 俘获电子形成激发态(Ce^{3+})*, 这绕过了第一步, 直接从第二步开始, 所以发光速度更快。目前, 关于 GAGG 中 Mg^{2+} 掺杂效果的主流解释都是基于此模型。

通过吸收谱测试可以发现, Mg^{2+} 掺杂的样品在 250~340 nm 波段存在 Ce^{4+} 的电荷迁移吸收带, 吸收带的强度随 Mg^{2+} 浓度增加而变强, 如图 5(a), 这证实了 Ce^{4+} 的存在。然而也有研究者认为 Ce^{4+} 不能发光, 它对发光过程是有害的^[8-10]。通过对比吸收谱和激发谱可以发现, 虽然 Ce^{4+} 在紫外波段有较强的吸

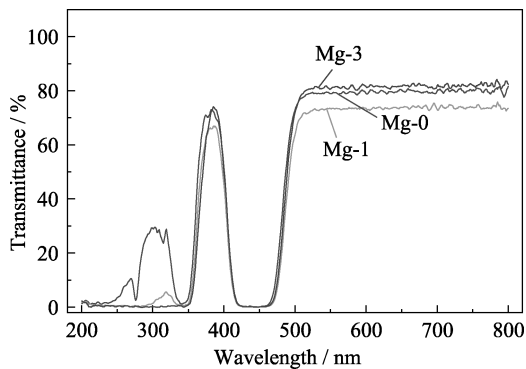


图 2 $Gd_3Al_{2.3}Ga_{2.7}O_{12}:Ce,Mg$ 晶体的透射谱
Fig. 2 Transmission spectra of $Gd_3Al_{2.3}Ga_{2.7}O_{12}:Ce, Mg$ crystals

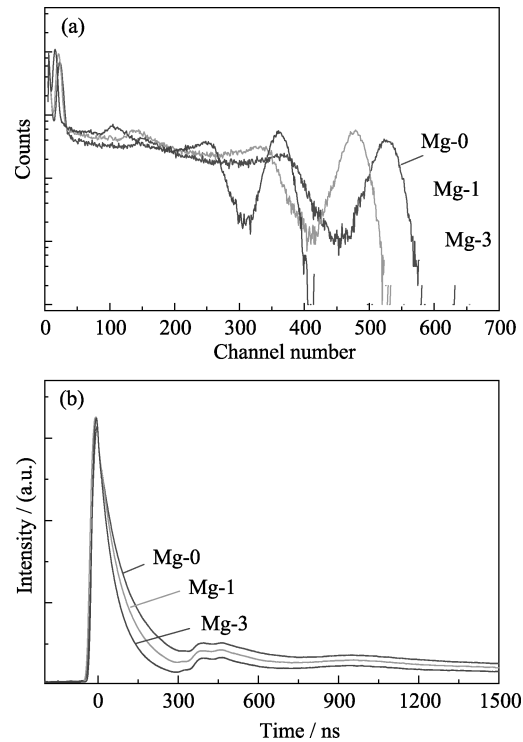


图 3 GAGG:Ce,Mg 晶体的多道能谱(a)和闪烁衰减曲线(b)
Fig. 3 Energy spectra (a) and scintillation decay curves (b) of Mg co-doped GAGG:Ce crystals

收, 电子从配位 O 转移到 Ce^{4+} ^[11-12], 但是并没有后续的荧光发射, 如图 5(b)。另一方面, 当低价离子的掺杂浓度增加时, 大量(甚至全部) Ce^{3+} 转换成 Ce^{4+} , 晶体的发光强度会降低(甚至发光消失), 这似乎也说明 Ce^{4+} 对发光过程是有害的, 它不是发光过程的中间态。另外, 上述解释 GAGG 中 Mg 掺杂效果的理论还面临一个问题无法回答: 低价的碱金属/碱土金属有很多, 为什么只有 Li 和 Mg 的效果最显著?

描述闪烁体发光过程的第二种模型则不涉及 Ce^{4+} , 如图 4(b)所示: 首先电子和空穴弛豫复合形成激子, 然后发光中心 Ce^{3+} 捕获激子形成激发态 (Ce^{3+})*, 最后激发态退激发光变回 Ce^{3+} ^[13]。如果将 Ce^{3+} 转换成 Ce^{4+} , 发光中心浓度降低则会导致发光强度变弱。基于该模型, 上述关于 GAGG 中 Mg

表 1 GAGG:Ce, Mg 晶体的相对光输出和闪烁衰减时间, 其中闪烁衰减时间通过单指数函数拟合得到
Table 1 Relative light yield and scintillation decay time values of the Mg co-doped GAGG:Ce crystals. Scintillation decay is approximated by a single-exponential function

Sample	Light yield/%	Decay time/ns
Mg-0	100	128.01
Mg-1	90.1	91.79
Mg-3	68.8	67.06

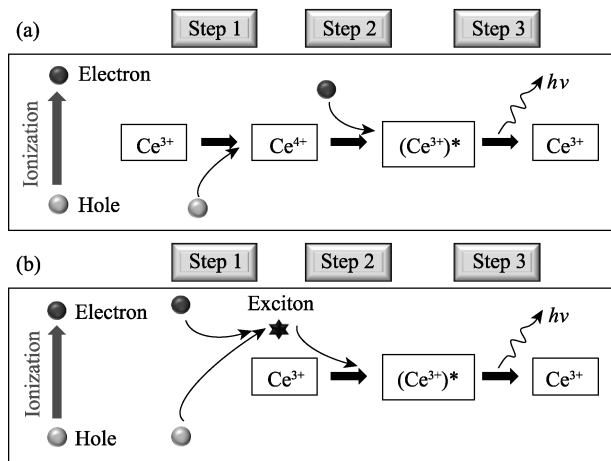


图 4 闪烁晶体发光过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the scintillating procedure

掺杂效果的解释就不再恰当, 需要从其他角度进行讨论。

2.2 反位缺陷的富集

石榴石结构的晶体中, 十二面体格位的稀土离子很容易进入八面体格位形成反位缺陷, 该缺陷在禁带中形成的陷阱能级会延缓从基体到发光中心的能量传递, 最终导致发光速度变慢^[14-15]。已有研究报道^[16-17], LuAG 中掺杂大半径的 La 或 Ce 会导致反位缺陷浓度增大。{Lu_{3-x}Ce_x}[Lu_yAl_{2-y}]Al₃O₁₂ 中反位缺陷的浓

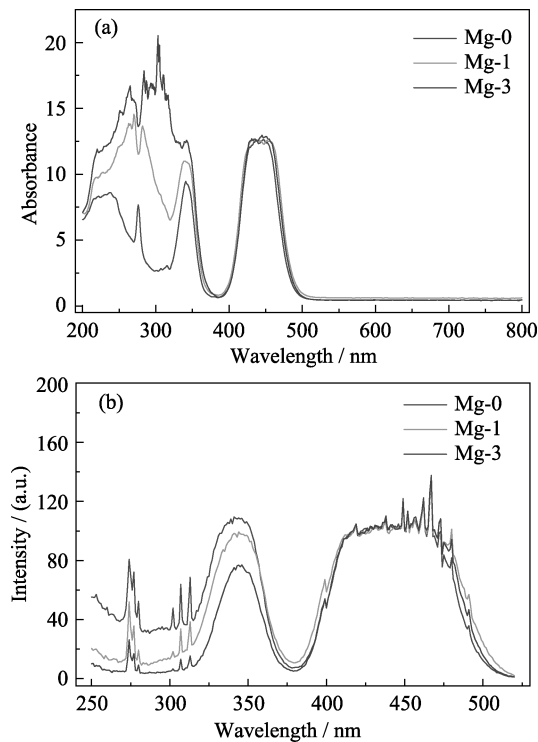


图 5 GAGG:Ce,Mg 晶体的吸收谱(a)和激发谱(b)

Fig. 5 Absorption spectra (a) and PL excitation spectra (b) of GAGG:Ce,Mg crystals

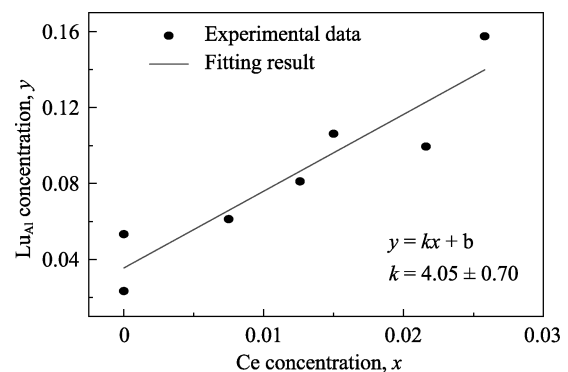
Colorful figures are available on website

度 y 与 Ce 的浓度 x 呈线性关系, 如图 6 所示, 通过拟合发现比例系数约为 4。根据前期工作得到的 GAGG 晶体结构数据构建晶格模型^[18], 可以发现十二面体格位(稀土格位)附近正好存在四个八面体格位(图 7(a))。这很容易让人猜测: 反位缺陷分为两部分(两种起源): 其中一部分是高温熔体中生长的石榴石结构晶体本身所具有的, 这一部分反位缺陷来源于“热激发”, 其浓度与掺杂离子无关, 均匀分布在晶格中。另一部分是 Ce 离子导致的, 其浓度与 Ce 的掺杂量相关, 并且分布在 Ce 周围。每个发光中心 Ce_{Gd} 被 4 个反位缺陷 Gd_{Al} 包裹。

在八配位情况下, Ce³⁺和 Gd³⁺的离子半径分别为 0.1143 和 0.1053 nm。大半径的 Ce 取代十二面体格位的 Gd 会使晶格发生畸变, 畸变导致附近的八面体格位的空间变大(图 7(b))。反位缺陷 Gd_{Al} 是大半径的 Gd 取代八面体格位的 Al, 所以它会更易形成在上述变大的八面体格位。与此同时, 在 GAGG 中大半径的 Ga 倾向于占据小体积的四面体格位, 小半径的 Al 倾向于占据大体积的八面体格位^[18], 为了平衡这种几何上的不稳定结构, 必将促进在八面体格位形成更多的反位缺陷 Gd_{Al}。此外, 由于发光中心 Ce_{Gd} 和反位缺陷 Gd_{Al} 都是大半径的离子取代小半径离子, 这在一定程度上会导致氧空位富集在它们附近以达到空间上的平衡。

2.3 Mg 对反位缺陷的抑制

部分阳离子的半径如表 2 所示。Mg²⁺的离子半径比 Al³⁺大, 所以 Mg_{Al} 也会倾向于形成在上述变大的八面体格位, 即富集在发光中心 Ce_{Gd} 附近。另一方面, Mg²⁺的离子半径比 Gd³⁺小, 所以相比于反位缺陷 Gd_{Al}, Mg_{Al} 对晶格的影响较小, Mg_{Al} 的形成能更低。综上所述, 尺寸因素决定 Mg_{Al} 更容易形成并且富集在发光中心 Ce_{Gd} 附近, 最终降低发光中心周围的反位缺陷数量, 所以从基体到发光中心的能量

图 6 LuAG:Ce 中反位缺陷 Lu_{Al} 的浓度与 Ce³⁺浓度的关系Fig. 6 Concentration of antisite defect Lu_{Al} in single crystal LuAG:Ce vs Ce³⁺ concentration

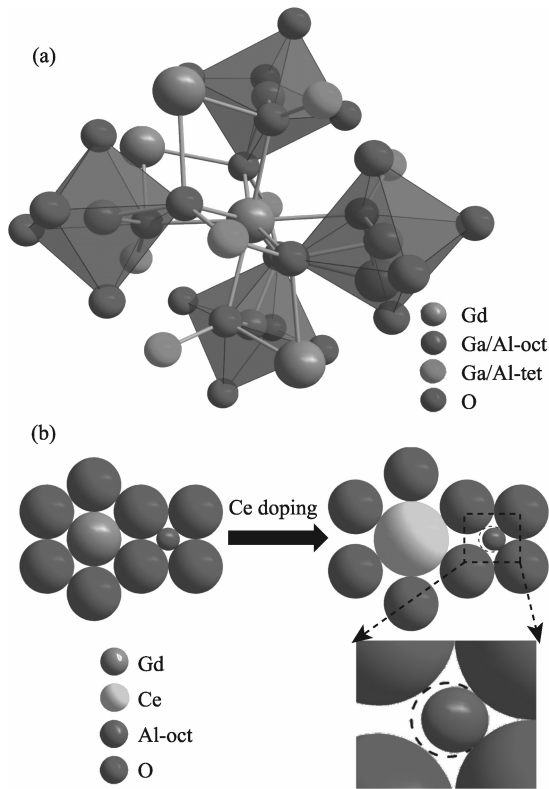


图 7 GAGG 晶格中十二面体格位附近的结构示意图(a)及 Ce 掺杂导致十二面体和八面体格位发生畸变的示意图(b)
Fig. 7 Schematic of the structure near the dodecahedral site (a), and the distortion of dodecahedral and octahedral sites caused by Ce doping (b)

传递过程将更顺畅, 闪烁发光速度更快。XEL 测试结果如图 8 所示, 550 nm 波长附近的强发射峰来自于 Ce³⁺的 5d-4f 跃迁, 380 nm 波长附近的弱发射峰与反位缺陷相关^[14, 19]。随着 Mg 掺杂浓度增大, 反位缺陷相关的发射峰逐渐变弱, 见图 8 插图, 这或许能说明 Mg²⁺掺杂抑制了反位缺陷的形成。其它更充分的证据还需进一步实验分析。

有效的发光中心为 Ce³⁺, 而 Ce⁴⁺的存在对发光效率有害。当 Mg²⁺的掺杂浓度增大, 电荷平衡作用导致 Ce³⁺浓度降低, 所以发光效率降低, 直至发光消失。第一、第二主族的元素中, 只有 Li⁺和 Mg²⁺的离子半径介于 Gd³⁺和 Al³⁺之间, 其他离子半径或大或小的元素都不能有效抑制反位缺陷在发光中心附近

表 2 部分阳离子的半径(配位数为 6^[20])

Table 2 Ionic radii of the cations (coordination number: 6^[20])

Cation	Ionic radii/nm	Cation	Ionic radii/nm
Gd ³⁺	0.0938	Na ⁺	0.1020
Al ³⁺	0.0535	Be ²⁺	0.0450
Ga ³⁺	0.0620	Mg ²⁺	0.0720
Li ⁺	0.0760	Ca ²⁺	0.1000

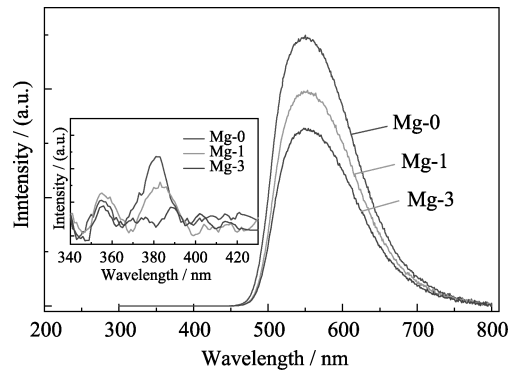


图 8 GAGG:Ce,Mg 晶体的 X 射线激发发射谱(插图为反位缺陷 Gd_{Al/Ga} 相关的发射峰)

Fig. 8 X-ray excited luminescence spectra of GAGG:Ce,Mg crystals with the inset showing the Gd_{Al/Ga}-related emission peak

Colorful figures are available on website

的形成(或富集), 所以掺杂效果较差, 比如 Ca²⁺^[6]。

3 结论

本工作通过提拉法生长了无共掺和不同浓度 Mg 共掺杂的 GAGG:Ce 单晶。测试结果发现引入 Mg 提高了晶体的发光速度, 但同时光输出也降低。本研究从另一个角度讨论了 Mg 改善 GAGG:Ce 晶体闪烁性能的作用机理。GAGG 中, 发光中心 Ce_{Gd} 被四个反位缺陷 Gd_{Al} 包围, 后者捕获电子, 延缓从基体到发光中心的能量传递, 最终导致发光速度变慢。由于 Mg 的离子半径介于 Al 和 Gd 之间, 所以 Mg_{Al} 也会在发光中心 Ce_{Gd} 附近形成, 这会抑制反位缺陷 Gd_{Al} 在发光中心附近形成(或富集), 最终降低(甚至消除)反位缺陷对发光中心的不良影响。由于有效的发光来自于 Ce³⁺, 掺杂过量的 Mg 将导致 Ce³⁺的浓度降低, 进而降低发光效率。如果掺杂离子的半径不在 Al 和 Gd 之间, 它就不能有效富集在发光中心附近, 不能抑制反位缺陷的形成(或富集)。

参考文献:

- [1] NIKL M. Scintillation detectors for X-rays. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(4): R37–R54.
- [2] KAMADA K, ENDO T, TSUTUMI K, *et al.* Composition engineering in cerium-doped (Lu,Gd)₃(Ga,Al)₅O₁₂ single-crystal scintillators. *Crystal Growth & Design*, 2011, **11**(10): 4484–4490.
- [3] KOCHURIKHIN V, KAMADA K, JIN KIM K, *et al.* Czochralski growth of 4-inch diameter Ce:Gd₃Al₂Ga₃O₁₂ single crystals for scintillator applications. *Journal of Crystal Growth*, 2020, **531**: 125384.
- [4] KAMADA K, YANAGIDA T, ENDO T, *et al.* 2 inch diameter single crystal growth and scintillation properties of Ce:Gd₃Al₂Ga₃O₁₂. *Journal of Crystal Growth*, 2012, **352**(1): 88–90.
- [5] KAMADA K, SHOJI Y, KOCHURIKHIN V V, *et al.* 2 inch size

- czochralski growth and scintillation properties of Li⁺ co-doped Ce:Gd₃Ga₃Al₂O₁₂. *Optical Materials*, 2017, **65**: 52–55.
- [6] KAMADA K, NIKL M, KUROSAWA S, *et al.* Alkali earth co-doping effects on luminescence and scintillation properties of Ce doped Gd₃Al₂Ga₃O₁₂ scintillator. *Optical Materials*, 2015, **41**: 63–66.
- [7] WU Y, MENG F, LI Q, *et al.* The role of Ce⁴⁺ in scintillation mechanism: codoped Gd₃Ga₃Al₂O₁₂:Ce. *Physical Review Applied*, 2014, **2(4)**: 044009.
- [8] FENG H, DING D, LI H, *et al.* Annealing effects on czochralski grown Lu₂Si₂O₇:Ce³⁺ crystals under different atmospheres. *Journal of Applied Physics*, 2008, **103(8)**: 083109.
- [9] ZHANG S, GU J, JIA G, *et al.* Effect of annealing on the spectroscopy performance of YVO₄:Ce³⁺ single crystals. *Optical Materials*, 2015, **39**: 178–181.
- [10] PAUWELS D, LE MASSON N, VIANA B, *et al.* A novel inorganic scintillator: Lu₂Si₂O₇:Ce³⁺ (LPS). *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, **47(6)**: 1787–1790.
- [11] LIU S, FENG X, ZHOU Z, *et al.* Effect of Mg²⁺ co-doping on the scintillation performance of LuAG:Ce ceramics. *Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, 2014, **8(1)**: 105–109.
- [12] AUFFRAY E, AUGULIS R, FEDOROV A, *et al.* Excitation transfer engineering in Ce-doped oxide crystalline scintillators by codoping with alkali-earth ions. *Physica Status Solidi (a)*, 2018, **215(7)**: 1700798.
- [13] SPASSKY D, KOZLOVA N, ZABELINA E, *et al.* Influence of the Sc cation substituent on the structural properties and energy transfer processes in GAGG:Ce crystals. *CrystEngComm.*, 2020, **22(15)**: 2621–2631.
- [14] NIKL M, MIHOKOVA E, PEJCHAL J, *et al.* The antisite Lu_{Al} defect-related trap in Lu₃Al₅O₁₂:Ce single crystal. *Physica Status Solidi (b)*, 2005, **242(14)**: R119–R121.
- [15] STANEK C R, MCCLELLAN K J, LEVY M R, *et al.* The effect of intrinsic defects on Re₃Al₅O₁₂ garnet scintillator performance. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, **579(1)**: 27–30.
- [16] PETROSYAN A G, OVANESYAN K L, SARGSYAN R V, *et al.* Bridgman growth and site occupation in LuAG:Ce scintillator crystals. *Journal of Crystal Growth*, 2010, **312(21)**: 3136–3142.
- [17] BARTOSIEWICZ K, HORIAI T, YAMAJI A, *et al.* Effects of La doping on the crystal growth, phase stability and scintillation properties of Lu₃Al₅O₁₂ single crystals. *Materials Science and Engineering: B*, 2020, **261**: 114677.
- [18] LI M, MENG M, CHEN J, *et al.* Abnormal site preference of Al and Ga in Gd₃Al_{2.3}Ga_{2.7}O₁₂:Ce crystals. *Physica Status Solidi (b)*, 2021, **258(8)**: 2000603.
- [19] BABIN V, BLAZEK K, KRASNIKOV A, *et al.* Luminescence of undoped LuAG and YAG crystals. *Physica Status Solidi (c)*, 2005, **2(1)**: 97–100.
- [20] JOHN A. Lange's Handbook of Chemistry: McGRAW-HILL.