

Ca²⁺离子掺杂对Ce:LuAG荧光粉的紫外激发荧光性能的影响

饶 聪

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 光学仪器与系统教育部工程中心, 上海

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月9日

摘 要

文章采用固态反应法制备了一系列Ca²⁺离子掺杂的Ce:LuAG荧光粉, 旨在研究Ca²⁺离子掺杂对Ce:LuAG荧光粉紫外激发荧光性能的影响。重点研究了样品的吸收谱、荧光光谱、荧光寿命以及热释光曲线。实验结果表明, 随着Ca²⁺离子的掺杂浓度的增加, 样品的光致发光谱强度显著降低。但是Ca²⁺离子的掺杂可以显著减少样品的荧光衰减时间。当Ca²⁺离子掺杂浓度为0.6 at%时, 荧光衰减时间相较于未掺杂Ca²⁺减少了27.62 ns。热释光曲线的结果显示, Ca²⁺离子的掺杂会显著降低热释光的强度。表明Ca²⁺离子的存在有助于抑制缺陷引起的负面效果。

关键词

光学材料, 荧光转换, 钙离子掺杂, 荧光寿命

Influence of Ca²⁺ Ion Doping on the UV Excitation Fluorescence Properties of Ce:LuAG Phosphors

Cong Rao

Engineering Research Center of Optical Instruments and Systems, Ministry of Education, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 9th, 2025

Abstract

In this paper, a series of Ca²⁺ doped Ce:LuAG phosphors were prepared using the solid-state reaction

method to investigate the effect of Ca^{2+} doping on the ultraviolet excitation fluorescence properties of Ce:LuAG phosphors. The absorption spectra, fluorescence spectra, fluorescence lifetime and thermoluminescence curves of the samples were analyzed. The experimental results indicate that with the increase of Ca^{2+} ion doping concentration, the photoluminescence intensity of the sample is significantly reduced. However, the doping of Ca^{2+} ions can markedly decrease the fluorescence decay time of the sample. When the doping concentration of Ca^{2+} ions is 0.6 at%, the fluorescence decay time is reduced by 27.62 ns compared to undoped Ca^{2+} . The results of the thermoluminescence curve demonstrate that the doping of Ca^{2+} ions significantly reduces the intensity of thermoluminescence. This indicates that the presence of Ca^{2+} ions helps to suppress the negative effects caused by defects.

Keywords

Optical Material, Fluorescence Conversion, Calciumion Doping, Fluorescence Lifetime

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

镨铝石榴石($\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)因其对各种射线的吸收系数大、物理化学性质稳定而成为一种优异的基质材料。以镨铝石榴石为基质的材料因为其独特的光学性能,在照明、激光和闪烁等领域有着广泛的应用[1]-[3]。其中 Tm 掺杂的 LuAG 晶体因其长荧光寿命、良好的吸收特性以及优异的光学性能,可以用于制造中红外波段的激光器[4]-[6]。Pr 掺杂的 LuAG 闪烁体因其快衰减时间和荧光热稳定性,广泛应用于正电子发射扫描(PET)成像[7]-[10]。Ce 掺杂的 LuAG 薄膜具有高发光效率和优异的物理热稳定性,常被用于高功率激光照明[11]。可以通过控制 LuAG:Ce 薄膜的厚度优化其发光性能。稀土离子掺杂的 LuAG 材料是目前研究的热门,特别是铈(Ce)离子掺杂的 LuAG 材料[12]-[17]。 Ce^{3+} 离子具有 4f-5d 电子组态,是一种性能优异的激活离子。相较于其他稀土离子, Ce^{3+} 离子具有更高的荧光效率以及更快的衰减时间[18]。由于 5d 激发态的电子寿命极短(通常在纳秒量级),使得其荧光衰减速率比其他稀土离子快 2~3 个数量级。因为快衰减的特性,其在能量探测领域有着十分重要的应用[19] [20]。例如在高能射线探测领域,Ce:LuAG 常常作为 X 射线、 γ 射线等高能射线探测的闪烁材料[21] [22]。

2019 年 Peter T. Dickens 团队发表了一篇关于铈(Ce)和钙(Ca)共掺钨铝石榴石(YAG)的闪烁体的论文,详细地研究了 Ca/Ce:YAG 闪烁体的闪烁性能以及晶体缺陷[23]。结果表明,Ca 共掺杂显著降低了闪烁衰减时间但产生了更多的空位缺陷。2019 年 Jiang Benxue 等人发表了一篇论文,报道了 Ce、Ca 共掺杂的 LuAG 闪烁体[24]。该闪烁体具有快衰减的特性。2020 年, Jiang Benxue 等人发表了一篇关于 Ce、Ca 共掺杂的 LuAG 闪烁陶瓷的论文[25]。通过 Ca^{2+} 的共掺杂,大大提高了 LuAG:Ce 的闪烁性能。 $\text{Ca}^{2+}/\text{Ce}^{3+}$:LuAG 闪烁陶瓷具有更高的光产额以及更快的衰减时间。2022 年 Li Jiang 等人研究了 Ca^{2+} 离子掺杂浓度对于 $\text{Ca}^{2+}/\text{Ce}^{3+}$:LuAG 闪烁陶瓷闪烁性能的影响[26]。虽然 Ca^{2+} 离子共掺杂可以提升 LuAG:Ce 的闪烁性能,但是对于紫外荧光性能的影响是未知的。

本文通过固态反应法制备了一系列 Ce、Ca 共掺杂的 LuAG 荧光粉末,研究了其结构、吸收和荧光光谱特性。重点探究了 Ca^{2+} 离子掺杂对 Ce:LuAG 荧光粉的紫外激发荧光性能的影响。

2. 实验过程

2.1. 材料制备

Ce^{3+} , Ca^{2+} 共掺杂的镧铝石榴石荧光粉是采用固态反应法制备的。其中 Ce^{3+} 离子的掺杂浓度固定为 0.8 at%, Ca^{2+} 离子的掺杂浓度分别为 0.2 at%、0.4 at%、0.6 at%和 0.8 at%。将纯氧化铝(99.99%纯度)、纯氧化镧(99.99%纯度)、纯氧化铈(99.99%纯度)和纯氧化钙(99.99%纯度)按照配比加入到玛瑙研磨仪中,并加入无水乙醇进行研磨,直至无水乙醇完全挥发。将混合均匀的粉体装入刚玉坩埚中,放入马费炉中 1600℃煅烧 3 h。煅烧结束后将冷却的样品研磨成粉。

2.2. 材料结构和光学性能表征与测试

首先,利用 X 射线衍射法(MiniFlex800, Rigaku, 日本)对样品的物相进行了分析。随后,通过紫外-可见光近红外分光光度计(SolidSpec-700i, Shimadzu, 日本)对样品的吸收谱进行了精确测量。为了进一步探究样品的紫外激发荧光性能,利用稳/瞬态荧光光谱仪(FLS1000, Edinburgh, 英国)对样品的光致发光发射谱和荧光衰减谱进行测量。最后,使用热释光光谱仪(TOSL-3DS, 容帆, 中国)对样品的热释光曲线进行了测试,分析 Ca^{2+} 离子掺杂对 $\text{LuAG}:\text{Ce}$ 荧光粉缺陷的影响。

3. 结果与讨论

图 1 为不同浓度 Ca^{2+} 离子共掺杂的 0.8 at% $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉的 X 射线衍射图谱(XRD)。通过对比样品的衍射峰与 LuAG 标准卡片(PDF#73-1368),衍射峰的位置基本一致,说明样品已经成了镧铝石榴石相。样品的 XRD 图谱中还存在 Lu_2O_3 的杂相,这是荧光粉烧结不充分导致的。如图 1(b)所示,将样品 33°~34.5°范围内的 XRD 图谱放大。可以发现随着掺杂 Ca^{2+} 浓度的增加,衍射峰向小角度发生偏移,衍射峰从 33.8°偏移至 33.78°。衍射峰的偏移由于 Ca^{2+} 离子取代了 Lu^{3+} 离子的格位导致。 Ca^{2+} 离子的离子半径为 99 pm, Lu^{3+} 离子的离子半径为 84.8 pm,所以 Ca^{2+} 离子的掺杂会使 LuAG 的晶格膨胀,导致衍射峰向小角度偏移。这种偏移现象也可以证明 Ca^{2+} 离子成功掺杂进晶格内部。

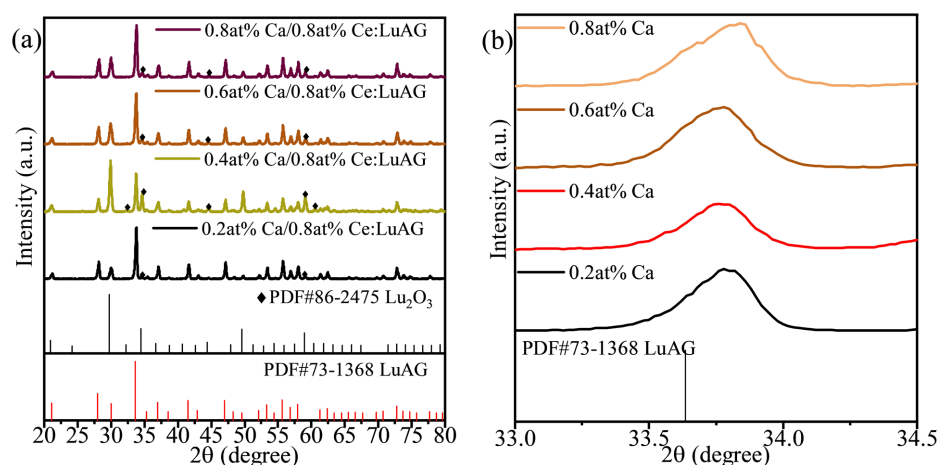


Figure 1. (a) X-ray diffraction pattern of $\text{Ca}^{2+}/\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ phosphor; (b) $\text{Ca}^{2+}/\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ phosphor diffraction peak amplification diagram in the range of 33°~34.5°

图 1. (a) $\text{Ca}^{2+}/\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉的 X 射线衍射图谱; (b) $\text{Ca}^{2+}/\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉 33°~34.5°范围内衍射峰的放大图

$\text{Ca}^{2+}/\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉的吸收图谱如图 2 所示,与未掺杂 Ca^{2+} 离子的 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉相比,其在 200~320 nm 的紫外吸收峰的强度更大。这种现象可以归因于 Ca^{2+} 离子的掺杂使得 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 内部的 Ce^{3+}

离子氧化成 Ce^{4+} 离子[24]-[27]。当 Ca^{2+} 离子进入到 LuAG 晶格中会取代 Lu^{3+} 离子格位，从而将 Ce^{3+} 离子氧化成 Ce^{4+} 离子以保持电荷平衡。随着 Ca^{2+} 离子掺杂浓度的增大，200~320 nm 的紫外吸收峰的强度也随之增大。这一现象表明， Ca^{2+} 离子掺杂浓度的增大会导致样品内部更多的 Ce^{3+} 离子氧化成 Ce^{4+} 离子。

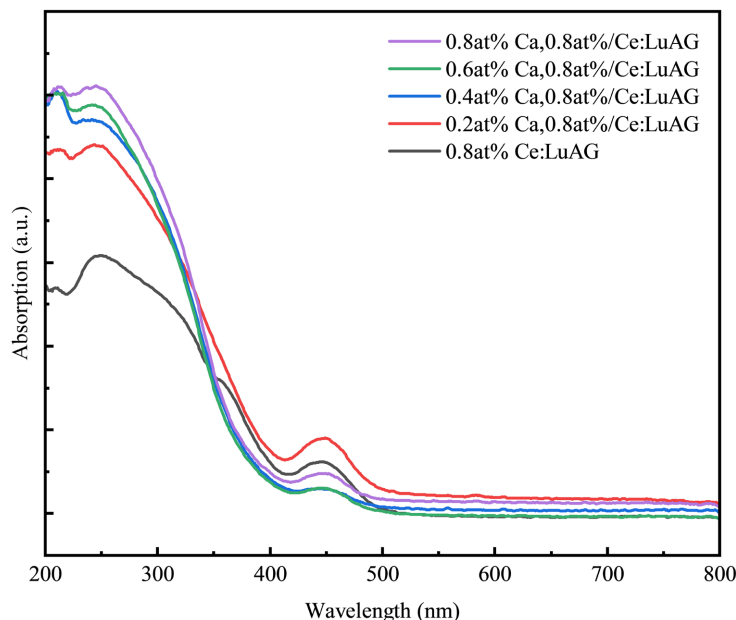


Figure 2. Absorption spectra of Ce^{3+} :LuAG phosphors doped with different Ca^{2+} ion concentrations

图 2. 不同 Ca^{2+} 离子浓度掺杂的 Ce^{3+} :LuAG 荧光粉的吸收光谱

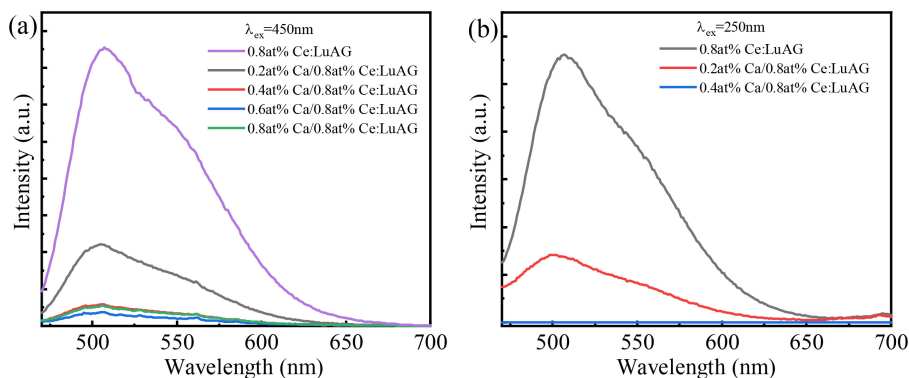


Figure 3. (a) The PL spectra of Ce^{3+} :LuAG phosphors doped with different Ca^{2+} ion concentrations under 450 nm blue light excitation; (b) PL spectra of Ce^{3+} :LuAG phosphors doped with different Ca^{2+} ion concentrations under 250 nm ultraviolet light excitation

图 3. (a) 不同 Ca^{2+} 离子浓度掺杂 Ce^{3+} :LuAG 荧光粉在 450 nm 蓝光激发下的 PL 谱; (b) 不同 Ca^{2+} 离子浓度掺杂 Ce^{3+} :LuAG 荧光粉在 250 nm 紫外光激发下的 PL 谱

为了研究 Ca^{2+} 离子掺杂对 Ce^{3+} :LuAG 荧光粉荧光性能的影响，测试了不同浓度 Ca^{2+} 离子共掺杂的 Ce^{3+} :LuAG (Ce 离子浓度为 0.8 at%) 荧光粉在 450 nm 蓝光和 250 nm 紫外光激发下的 PL 谱。如图 3 所示， Ca^{2+} 离子的掺杂会使样品的发射光荧光强度出现明显的下降。 Ca^{2+} 掺杂浓度为 0.2 at% 的样品在 450 nm 蓝光的激发下，其发射光荧光强度相较于未掺杂的样品下降了 70%。增加 Ca^{2+} 离子掺杂浓度，发射光荧光强度会进一步降低。当 Ca^{2+} 掺杂浓度达到 0.8 at% 时，发射光的荧光强度只有未掺杂样品的 10%。在 250 nm 紫外光的激发， Ca^{2+} 的掺杂也存在抑制荧光强度的现象。当 Ca^{2+} 掺杂浓度达到 0.4 at% 时，样品在 250

nm 紫外光的激发下完全不发光。以上抑制荧光发射现象可能是因为 Ca^{2+} 离子使 Ce^{3+} 离子氧化为 Ce^{4+} 导致的。 Ce^{4+} 离子不是典型的发光中心，其发光机制依赖于电荷转移或者缺陷[23]。当 Ca^{2+} 离子浓度增加，使样品内部 Ce^{4+} 离子浓度增加， Ce^{3+} 离子浓度减小，从而降低了样品的荧光发射强度。这与 $\text{Ca}^{2+}/\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉吸收谱的结论一致。

Ce^{4+} 离子的存在虽然会降低发射光的荧光强度，但是会有助于缩短荧光衰减时间。为了验证这一点，测试了样品在 450 nm 激发下的荧光衰减图谱。如图 4 所示， Ca^{2+} 离子的掺杂显著缩短了样品的荧光衰减时间。随着 Ca^{2+} 离子浓度的增加，荧光衰减时间逐渐减小，这与其他论文中的结论一致[24]。在其他 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光材料中， Mg^{2+} 离子的掺杂导致了 Ce^{3+} 的氧化和 $\{\text{Ce}^{3+}\sim\text{Mg}^{2+}\}$ 对的形成，从而导致了更快的荧光衰减[28] [29]。 Ca^{2+} 离子是一种与 Mg^{2+} 离子作用相似的低价离子，其共掺杂也起着相似的作用。随着 Ca^{2+} 离子浓度从 0 at% 增加到 0.6 at%，荧光衰减时间从 68.60 ns 降低到 40.98 ns。表 1 汇总了不同 Ca^{2+} 离子掺杂浓度样品的荧光寿命。不同 Ca^{2+} 离子掺杂浓度样品的荧光衰减图谱的拟合曲线如图 5 所示。

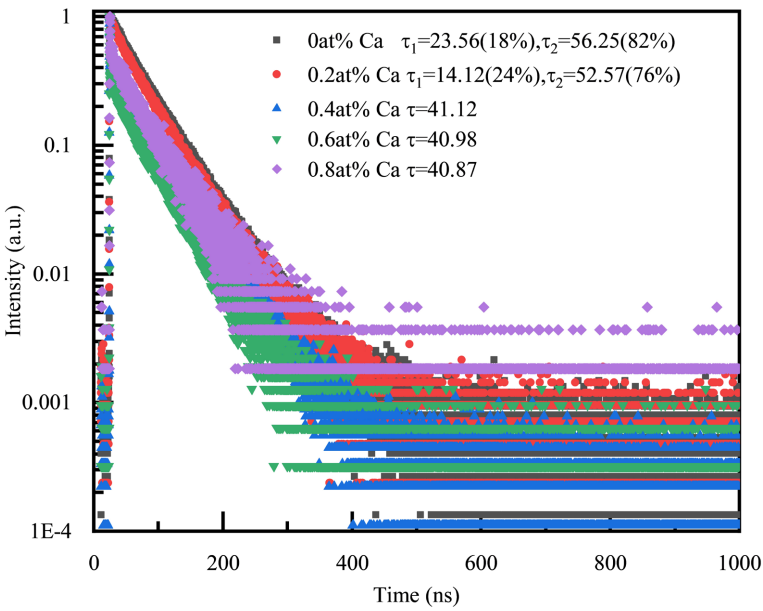


Figure 4. Fluorescence decay curves of $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ phosphors doped with different Ca^{2+} ion concentrations at 514 nm emission light
图 4. 不同 Ca^{2+} 离子浓度掺杂的 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉 514 nm 发射光的荧光衰减曲线

Table 1. Fluorescence lifetime of $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ phosphors doped with different Ca^{2+} concentrations
表 1. 不同 Ca^{2+} 浓度掺杂 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉的荧光寿命

样品	τ_1 (I_1) ns (%)	τ_2 (I_2) ns (%)	τ_m (ns)
0 at% Ca	23.56 (18%)	56.25 (82%)	68.60
0.2 at% Ca	14.12 (19%)	52.57 (81%)	45.31
0.4 at% Ca	0 (0%)	47.55 (100%)	47.55
0.6 at% Ca	0 (0%)	40.98 (100%)	40.98
0.8 at% Ca	0 (0%)	46.82 (100%)	46.82

热激发发光是研究荧光材料缺陷的一种有效方法，图 6 为不同 Ca^{2+} 离子浓度掺杂的 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉在 365 nm 的紫外光照射一段时间后测试的热释光曲线(TSL)。结果显示， Ca^{2+} 离子的掺杂可以降低热

释光强度,对缺陷引起的负面效果有显著抑制[23]-[26]。结合 Ce^{4+} 可以降低荧光衰减时间,所以 Ca^{2+} 离子掺杂的 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉的快衰减特性是合理的。

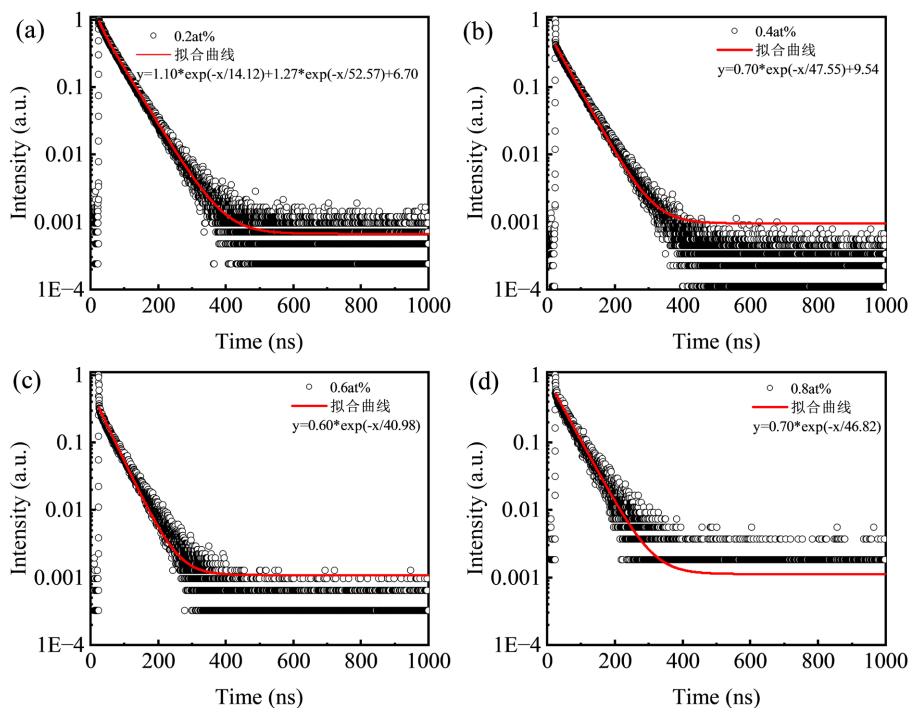


Figure 5. The fitting curve of the fluorescence decay spectrum of $\text{Ca}^{2+}/\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ phosphor at 514 nm emission light

图 5. $\text{Ca}^{2+}/\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉 514 nm 发射光的荧光衰减图谱拟合曲线

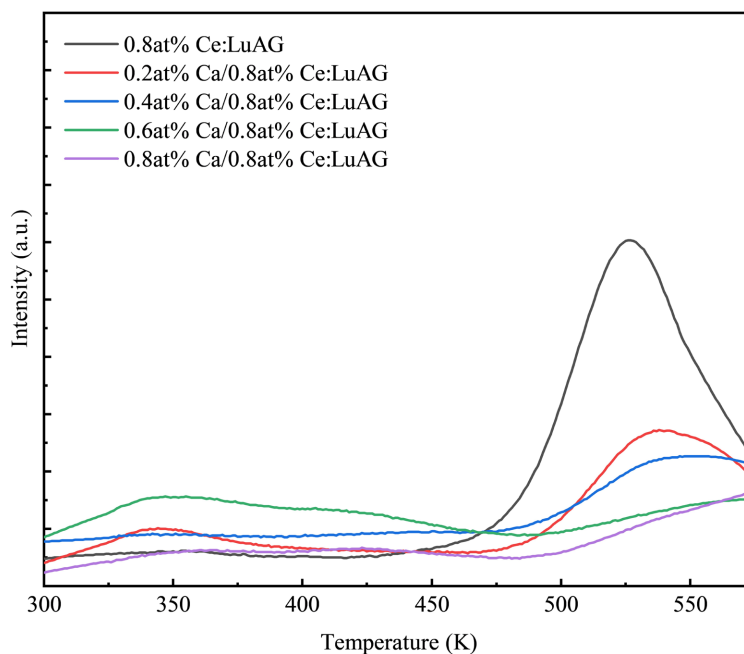


Figure 6. Thermoluminescence curves (TSL) of $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ phosphors doped with different Ca^{2+} ion concentrations

图 6. 不同 Ca^{2+} 离子浓度掺杂的 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉的热释光曲线(TSL)

4. 结论

本文制备了不同 Ca^{2+} 离子浓度掺杂的 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuAG}$ 荧光粉, 并对其紫外荧光性能进行了深入的研究。结果表明, Ca^{2+} 离子掺杂会极大地降低荧光发射谱的强度。当 Ca^{2+} 掺杂浓度为 0.4 at% 时, 样品在 250 nm 紫外光激发下无响应。这是由于 Ca^{2+} 的引入会导致发光中心 Ce^{3+} 离子氧化成 Ce^{4+} 离子。而 Ce^{4+} 离子由于 4f 轨道缺乏参与发光的电子, 不是常规的发光中心。 Ca^{2+} 离子浓度的增加会加剧这个过程, 从样品的吸收谱中可以证明这一点。 Ce^{4+} 离子的引入可以缩短荧光材料的荧光衰减时间。荧光衰减图谱的结果显示, Ca^{2+} 离子的引入极大地缩短了样品的荧光衰减时间。当掺杂 0.8 at% 的 Ca^{2+} 离子时, 荧光寿命从 68.60 ns 缩短至 46.82 ns。虽然 Ca^{2+} 离子掺杂可以极大地缩短荧光衰减的时间, 但是会显著抑制紫外光激发的光致发光强度。

致 谢

首先我要感谢我的导师在我研究上提供支持, 让我的实验能够顺利进行。然后感谢我的同门以及师弟师妹对我的帮助。

参考文献

- [1] Jiang, N., Zhao, Y., Zhu, Z., Li, W., Qu, H., Chen, H., *et al.* (2019) Fabrication and Laser Performance of Planar Waveguide LuAG/Yb: LuAG/LuAG Ceramics. *Optical Materials*, **89**, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.01.033>
- [2] Huang, C., Li, S., Zhao, C. and Hang, Y. (2023) Emission Cross Section Redetermination of Nd: LuAG Crystals. *Optics Letters*, **48**, 5507-5510. <https://doi.org/10.1364/ol.506166>
- [3] Quan, J., Yang, X., Long, S., Yang, M., Ma, D., Huang, J., *et al.* (2019) Growth and Fluorescence Characteristics of Er: LuAG Laser Crystals. *Journal of Crystal Growth*, **507**, 321-326. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.11.037>
- [4] Li, Q., Shi, Z., Song, Q., Tian, J., Liu, J., Xu, X., *et al.* (2021) The Micro-Pulling-Down Growth of Tm: LuAG and Tm, Pr: LuAG Crystals and Optical Properties. *Optical Materials*, **118**, Article ID: 111275. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111275>
- [5] Song, Q., Xu, X., Zhou, Z., Xu, B., Li, D., Liu, P., *et al.* (2018) Laser Operation in a Tm: LuAG Crystal Grown by the Micro-Pulling-down Technique. *IEEE Photonics Technology Letters*, **30**, 1913-1916. <https://doi.org/10.1109/lpt.2018.2872008>
- [6] Chen, Y., Wang, R., Yao, B., Liu, G., Yang, C., Dai, T., *et al.* (2019) Acousto-Optic Mode-Locked Tm: LuAG Laser with Nearly Diffraction-Limited Beam. *Optical and Quantum Electronics*, **51**, Article No. 353. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2069-4>
- [7] Kumar, S.A. and Senthilselvan, J. (2019) Silica Encapsulated LuAG: Pr^{3+} Nanocrystals by Surfactant Assisted Co-Precipitation and Microwave Calcination: Structural, Growth Mechanism, Photoluminescence and Thermoluminescence Properties. *Materials Chemistry and Physics*, **233**, 296-309. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.062>
- [8] Trofimov, A.A., Marchewka, M.R. and Jacobsohn, L.G. (2019) Effects of Sintering Temperature on the Microstructure and Luminescence of LuAG: Pr Ceramics. *Radiation Measurements*, **122**, 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.01.005>
- [9] Hu, Z., Chen, X., Dai, J., Chen, H., Shi, Y., Kou, H., *et al.* (2018) The Influences of Stoichiometry on the Sintering Behavior, Optical and Scintillation Properties of Pr: LuAG Ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, **38**, 4252-4259. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.05.014>
- [10] 周鼎, 施鹰, 范灵聪, 等. Ce, Pr 离子双掺 LuAG 透明陶瓷制备及光学性能[J]. 无机材料学报, 2016, 31(10): 1099-1102.
- [11] Liu, S., Xue, B., Zhou, L., Cui, H., Liu, M., Chen, L., *et al.* (2024) Tailoring Thermal Behavior and Luminous Performance in LuAG: Ce Films via Thickness Control for High-Power Laser Lighting Applications. *Rare Metals*, **43**, 6537-6548. <https://doi.org/10.1007/s12598-024-03023-x>
- [12] Arun Kumar, S., Subalakshmi, K., Ashok Kumar, K., Sandhu, S., Dang Quang, L.N., Jana, A., *et al.* (2020) Microstructure, Luminescence, and Dielectric Properties of Microwave-Sintered Ce: LuAG Nano-Ceramics. *Ceramics International*, **46**, 27092-27098. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.186>
- [13] Inkrataite, G., Skruodiene, M. and Skaudzius, R. (2024) Synthesis and Investigation of Novel Boron and Magnesium-Doped YAG: Ce and LuAG: Ce Phosphor Ceramics. *Luminescence*, **39**, e4673. <https://doi.org/10.1002/bio.4673>

- [14] Kuznetsova, Y.V., Popov, I.D., Yakovleva, S.A., Bykov, V.A., Barakovskikh, D.S. and Vlasova, S.G. (2024) Yellow-White Emitting Phosphor-In-Glass with LuAG: Ce and Embedded CdS Quantum Dots. *Journal of Luminescence*, **269**, Article ID: 120500. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2024.120500>
- [15] Khanin, V., Meijerink, A., Houtepen, A.J., Jagt, H.J.B. and de Boer, D.K.G. (2021) Photosaturation in Luminescent LuAG: Ce Garnet Concentrator Rods. *Advanced Photonics Research*, **2**, 1-11. <https://doi.org/10.1002/adpr.202100055>
- [16] Inkrataite, G., Keil, J., Zarkov, A., Jüstel, T. and Skaudzius, R. (2023) The Effect of Boron and Scandium Doping on the Luminescence of LuAG: Ce and GdAG: Ce for Application as Scintillators. *Journal of Alloys and Compounds*, **966**, Article ID: 171634. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171634>
- [17] Zhou, M., Sun, J., Zhang, B., Hua, Y., Huang, F., Ma, H., et al. (2023) Ultra-High Efficiency Green-Emitting LuAG: Ce Phosphor-in-Ceramic Applied for High-Power Laser Lighting. *Journal of the European Ceramic Society*, **43**, 3563-3571. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.01.055>
- [18] Tang, Y., Qiang, M., Lou, W., Ding, Y., Lin, H., Hong, R., et al. (2024) Ga/Al Ratio Induced Afterglow Behavior of Ce³⁺: GAGG Scintillation Ceramics. *Ceramics International*, **50**, 36286-36294. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.012>
- [19] Matsumoto, S. and Ito, A. (2022) High-Throughput Production of LuAG-Based Highly Luminescent Thick Film Scintillators for Radiation Detection and Imaging. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 19319. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23839-w>
- [20] Wang, T., Hu, S., Ji, T., Zhu, X., Zeng, G., Huang, L., et al. (2024) High-Temperature X-Ray Imaging with Transparent Ceramics Scintillators. *Laser & Photonics Reviews*, **18**, Article 2300892. <https://doi.org/10.1002/lpor.202300892>
- [21] Yanagida, T., Fujimoto, Y., Yokota, Y., Kamada, K., Yanagida, S., Yoshikawa, A., et al. (2011) Comparative Study of Transparent Ceramic and Single Crystal Ce Doped LuAG Scintillators. *Radiation Measurements*, **46**, 1503-1505. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.03.039>
- [22] Kobayashi, M., Aogaki, S., Takeuchi, F., Tamagawa, Y. and Usuki, Y. (2012) Performance of Thin Long Scintillator Strips of GSO: Ce, LGSO: Ce and LuAG: Pr for Low Energy Γ -Rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **693**, 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.07.045>
- [23] Dickens, P.T., Haven, D.T., Friedrich, S. and Lynn, K.G. (2019) Scintillation Properties and Increased Vacancy Formation in Cerium and Calcium Co-Doped Yttrium Aluminum Garnet. *Journal of Crystal Growth*, **507**, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.10.059>
- [24] Ma, W., Jiang, B., Chen, S., Feng, X., Zhu, Q., Zhang, L., et al. (2019) A Fast Lutetium Aluminum Garnet Scintillation Ceramic with Ce³⁺ and Ca²⁺ Co-Dopants. *Journal of Luminescence*, **216**, Article 116728. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116728>
- [25] Ma, W., Jiang, B., Feng, X., Huang, X., Wang, W., Sreebunpeng, K., et al. (2020) On Fast LuAG: Ce Scintillation Ceramics with Ca²⁺ Co-Dopants. *Journal of the American Ceramic Society*, **104**, 966-973. <https://doi.org/10.1111/jace.17506>
- [26] Zhu, D., Chen, X., Beitzlerova, A., Kucerkova, R., Li, X., Liu, Z., et al. (2022) Influence of Calcium Doping Concentration on the Performance of Ce, Ca: LuAG Scintillation Ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, **42**, 6075-6084. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.06.023>
- [27] Tyagi, M., Meng, F., Koschan, M., Donnal, S.B., Rothfuss, H. and Melcher, C.L. (2013) Effect of Codoping on Scintillation and Optical Properties of a Ce-Doped Gd₃Ga₃Al₂O₁₂ Scintillator. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **46**, Article ID: 475302. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/47/475302>
- [28] Babin, V., Boháček, P., Jurek, K., Kučera, M., Nikl, M. and Zazubovich, S. (2018) Dependence of Ce³⁺-Related Photo- and Thermally Stimulated Luminescence Characteristics on Mg²⁺ Content in Single Crystals and Epitaxial Films of Gd₃(Ga, Al)₅O₁₂: Ce, Mg. *Optical Materials*, **83**, 290-299. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.05.087>
- [29] Babin, V., Herman, P., Kucera, M., Nikl, M. and Zazubovich, S. (2019) Effect of Mg²⁺ Co-Doping on the Photo and Thermally Stimulated Luminescence of the (Lu, Gd)₃(Ga, Al)₅O₁₂: Ce Epitaxial Films. *Journal of Luminescence*, **215**, Article ID: 116608. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116608>