

文章编号: 1002-1582(2025)05-0557-06

钴掺杂钇铝石榴石透明陶瓷 紫外激发荧光性能研究

饶聪, 林辉*

(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 200093)

摘 要: 文章采用固态反应法制备了 Co^{2+} 掺杂的YAG透明陶瓷, 旨在探讨其在深紫外探测领域的应用潜力。为此, 系统研究了样品在深紫外光激发下的光谱性能。重点分析了深紫外光激发下的发射光谱, 以及光谱强度(峰值和积分)与激光激发条件(重复频率、单脉冲能量和激发光斑尺寸)之间的线性响应关系。实验结果表明, 样品在深紫外光激发下呈现出峰值波长541nm的窄带($\text{FWHM}=45\text{nm}$)荧光发射光。此外, 该材料的光谱强度(峰值和积分)与激光激发条件(重复频率、单脉冲能量及激发光斑尺寸)的线性相关性均大于0.97, 表明该材料的荧光转换信号强度与入射能量强度呈良好的正比关系, 在深紫外探测领域展现了 Co^{2+} :YAG透明陶瓷良好的应用潜力。

关 键 词: 光学材料; 过渡金属离子发光; 紫外探测; 荧光转化; 响应线性度; 透明陶瓷

中图分类号: TN23; O433; TQ174.65

文献标识码: A

Fluorescence properties of divalent cobalt doped yttrium aluminate garnet transparent ceramics under the ultraviolet excitation

RAO Cong, LIN Hui*

(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 200093, China)

Abstract: Co^{2+} -doped YAG transparent ceramics were fabricated by the solid state reaction method, aiming to explore their application in deep ultraviolet (DUV) detection. To this end, The spectral properties of the samples under DUV light excitation were systematically studied. The emission spectra under DUV excitation and the linear response between the spectral intensity (peak and integral) and the laser excitation conditions (repetition frequency, single-pulse energy, and excitation spot size) were analyzed. The experimental results revealed that the samples exhibited narrowband ($\text{FWHM}=45\text{ nm}$) fluorescence emission at a peak wavelength of 541 nm under DUV excitation. Furthermore, the linear correlation coefficients between the spectral intensity (peak and integral) and the laser excitation conditions (repetition frequency, single-pulse energy, and excitation spot size) all exceeded 0.97, indicating a strong proportional relationship between the fluorescence conversion signal intensity and the incident energy intensity. This demonstrates the promising application potential of Co^{2+} :YAG transparent ceramics in DUV detection.

Keywords: optical materials; transition metal ion luminescence; UV detection; fluorescence conversion; response linearity; transparent ceramics

收稿日期: 2025-03-13; 收到修改稿日期: 2025-04-07

作者简介: 饶聪 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事能量探测用荧光转换材料的研究。222180350@st.usst.edu.cn
林辉 (1981—), 男, 博士, 教授, 从事无机发光材料、能量探测用荧光转换材料及半导体照明等方向的研究。

* 通讯作者: linh8112@163.com

0 引 言

石榴石材料是一种性能优异的发光基质材料,在能量探测、照明、医学成像等领域展现出了极高的应用价值^[1-4]。例如镱(Yb)元素掺杂的钇铝石榴石(YAG)材料因为其优良的闪烁特性而受到关注^[6-8]。这些特性包括极快的响应时间和在高能物理、空间辐射探测等领域的应用潜力。铈(Ce)元素掺杂的钇铝石榴石陶瓷,因其透明性好、硬度高、耐腐蚀、耐高温、制作工艺简单、生产成本低,可以大批量生产,而取代荧光粉广泛应用于LED光源^[9-11]。铒(Er)元素掺杂的钇铝石榴石材料因其光学质量高及较宽的吸收和发射带宽,常被作为激光器的增益介质^[12-14]。此外钴元素掺杂的荧光材料因为其独特的光学性能在激光领域有很多的应用。钴掺杂尖晶石($\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$)因为其高损伤阈值以及出色的物理热稳定性以及化学稳定性,在激光技术中应用于被动调Q^[15,16]。尽管钴掺杂的YAG材料研究较少,但已有相关工作表明其潜力。2005年, Satapathy添加氧化钴作为烧结辅助强化YAG陶瓷^[16]。Agnieszka在2020年发表的论文中, $\text{Co}^{2+}:\text{YAG}$ 则主要被认为是一种快速饱和吸收体^[18]。这些研究为 $\text{Co}^{2+}:\text{YAG}$ 在激光技术中的应用提供了理论基础。透明陶瓷相较于单晶材料,具有更短的制作周期和更低的制作成本,同时能够更便捷地制备大尺寸和高浓度掺杂的样品。与玻璃材料相比,透明陶瓷具备更高的物理热稳定性和机械强度。因此,透明陶瓷综合了单晶的优异光学性能和玻璃的工艺灵活性,是一种兼具高性能和高应用潜力的先进材料。

紫外准分子激光器在微纳米加工领域有着十分重要的应用,这得益于其高光子能量和高分辨率的特性,使其能够进行高精度的微纳加工^[19-25]。在微纳加工过程中,光源的稳定性至关重要,因此在紫外激光源的使用中,对其输出能量的实时监测是必不可少的。目前的DUV探测器是通过半导体器件直接对深紫外光源进行探测^[26-28]。由于深紫外的光子能量非常高,直接测量的方式会对光电二极管的寿命造成非常大的影响。为了克服这一问题,采用荧光转换的方式对深紫外光进行间接测量是一种有效的解决方案。间接测量方法的核心在于选择合适的荧光转换材料,其发射光谱需与探测器的光谱响应范围相匹配,并且需要具备良好的线性响应特性,以确保测量结果的准确性和可靠性。

此前的研究者虽然成功制备了 Co^{2+} 离子掺杂

的钇铝石榴石透明陶瓷,但其是作为固体激光器的饱和吸收体。 $\text{Co}^{2+}:\text{YAG}$ 在深紫外光激发下的荧光性能是未知的。

本文通过真空固相反应烧结法成功制备了 $\text{Co}^{2+}:\text{YAG}$ 透明陶瓷,研究了其结构、吸收和荧光光谱特性,特别是其在深紫外光激发下的荧光性能。

1 实验过程

1.1 材料的制备

$\text{Y}_3(\text{Al}_{(1-x\%)}\text{Co}_{x\%})_5\text{O}_{12}$ ($x=0.02$ 、 0.2 和 2)透明陶瓷是采用固态反应的方法制备,利用湿式球磨法制备样品粉料。将纯氧化铝(99.99%纯度)、纯氧化钇(99.99%纯度)以及纯三氧化二钴(99.99%纯度)按照配比加入到装有无水乙醇的球磨罐中。再加入正硅酸乙酯(添加量1wt%)、聚乙二醇(添加量0.5wt%)以及氧化镁(99.99%纯度,添加量0.1wt%)作为烧结助剂。其中正硅酸乙酯的添加量为1wt%,聚乙二醇的添加量为0.5wt%,氧化镁的添加量为0.1wt%。混合好的粉体放入球磨机中,以200r/min转速球磨12~48h。球磨后浆料放入烘箱在100~120℃恒温下烘干,干燥后的粉体在100目的筛网中过筛。过筛后的粉末放入马费炉中800℃中素烧3h以去除其中的有机物。粉末在模具中压片后,再放入冷等静压机中在250MPa的压力进行进一步提高素坯密度。后将素坯放置于真空炉中在1770℃下保温烧结3h。最后,将真空烧结所得到的 $\text{Co}^{2+}:\text{YAG}$ 透明陶瓷样品进行研磨、双面抛光至1mm的厚度。透明陶瓷样品的照片如图1所示,从左往右分别是浓度为0.02at%、0.2at%和2at%的 $\text{Co}^{2+}:\text{YAG}$ 透明陶瓷。 $\text{Co}^{2+}:\text{YAG}$ 透明陶瓷样品呈现蓝色,且颜色随着 Co^{2+} 离子掺杂浓度的增加而加深。

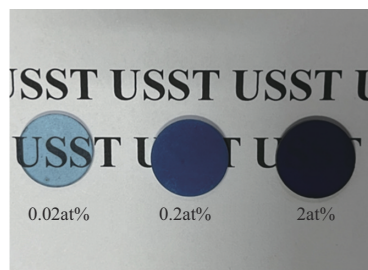


图1 $\text{Co}^{2+}:\text{YAG}$ 透明陶瓷样品的照片

1.2 材料结构和光学性能的表征与测试

首先,利用X射线衍射法(MiniFlex800, Rigaku, 日本)对陶瓷样品进行了定性相分析,以确定其晶体结构和相组成。利用扫描电子显微镜(SEM)(Regulus8100, HITACHI, 日本)对陶瓷样品的微观形貌进行了观察。随后,通过紫外-

可见-近红外分光光度法 (SolidSpec-3700i, Shimadzu, 日本) 对样品的透过率进行了精确测量, 以评估其不同波长范围内的光学透过性能。

为进一步探究样品的深紫外光学特性, 使用深紫外激光器 (MM-Excimer-193, Optec, 比利时) 作为激发光源, 其工作波长为 193nm, 最大重复频率为 500Hz, 最大单脉冲能量为 13mJ。光致发光 (PL) 光谱测量则采用光纤光谱仪 (AvaSpec-ULS2048XL-EVO, Avantes, 荷兰) 对光谱信号进行探测。实验中, 系统地测试了 Co^{2+} :YAG 透明陶瓷在不同激发条件 (包括激光重复频率、激光单脉冲能量和激光斑孔径) 下的发射光谱, 并记录了其峰值强度与积分强度, 以分析样品对深紫外激光激发的响应线性度。通过这些测试, 评估了 Co^{2+} :YAG 透明陶瓷在深紫外光激发下的光学性能。

2 结果与讨论

图 2 为 0.02at% Co^{2+} :YAG 透明陶瓷样品的 X 射线衍射 $\theta \sim 2\theta$ 扫描图谱。通过将样品衍射峰的位置与 YAG 标准卡片 (PDF#33-0040) 进行对比, 样品的晶面衍射峰均与标准卡片一致, 无明显二相生成。通过观察 XRD 的 (4 2 0) 衍射峰可以发现, 随着 Co^{2+} 掺杂浓度的增加, 其衍射峰会向小角度的方向偏移, 这可以归因于 Co^{2+} 离子取代了 YAG 晶格中 Al^{3+} 离子的格位。由于四配位环境下 Co^{2+} 的离子半径 (58pm) 大于 Al^{3+} 的离子半径 (53.5pm)。所以 Co^{2+} 离子的掺杂会使晶格膨胀, 从而导致衍射峰向小角度方向偏移的现象。

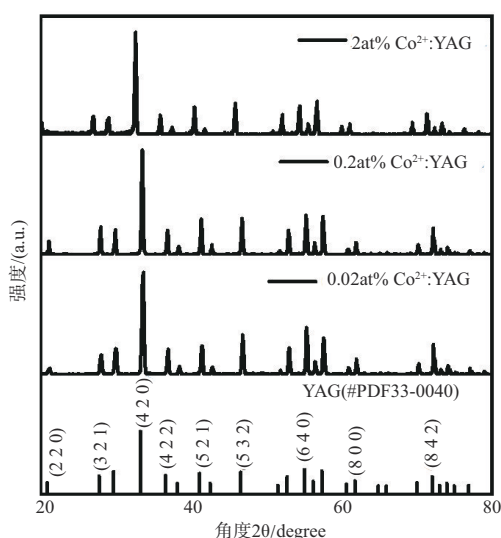


图 2 Co^{2+} :YAG 系列透明陶瓷样品的 X 射线衍射谱

0.02at% Co^{2+} :YAG 透明陶瓷样品热腐蚀表面的 SEM 照片如图 3 所示。结果表明, 透明陶瓷具有致密结构且晶界清晰。氧化钴的存在也有助于

透明陶瓷的烧结^[17]。利用 nano measurer1.2 软件对晶粒尺寸进行统计。为确保统计的准确性, 统计的晶粒数为 390 个。如图 3 插图所示, 晶粒的平均尺寸为 11.4 μm 。从 SEM 上可以看到陶瓷内部存在孔隙, 这对于透明陶瓷的光学透过率会有影响^[29]。利用阿基米德排水法测定, 0.02at% Co^{2+} :YAG 陶瓷的密度为 4.46g/cm³。

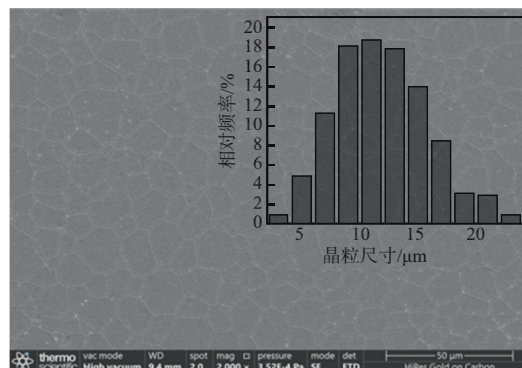


图 3 0.02at% Co^{2+} :YAG 透明陶瓷样品热腐蚀表面的 SEM 照片

Co^{2+} :YAG 透明陶瓷样品在可见光范围内的透射光如图 4 所示。0.02at% Co^{2+} :YAG 透明陶瓷在大约 600nm 范围内观察到吸收带, 这与文献中报道的一致^[18]。透射光谱可以反映出 0.02at% Co^{2+} :YAG 在 400~500nm 以及 700~800nm 的范围内其透过率都大于 70%。但是制备高浓度 (0.2at% 和 2at%) 的 Co^{2+} :YAG 的透过率十分不理想, 其在可见光和紫外光范围内的透过率均低于 20%。由于能量探测用荧光转换材料对透过率有一定的要求, 所以制备的高浓度 (0.2at% 和 2at%) 的 Co^{2+} :YAG 陶瓷并不是深紫外探测的理想材料。

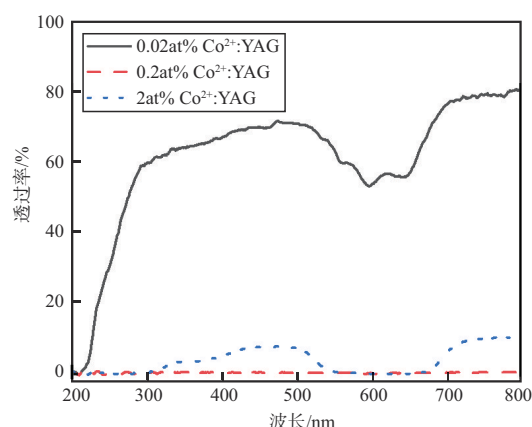


图 4 Co^{2+} :YAG 的透射光谱

图 5 是 0.02at% Co^{2+} :YAG 透明陶瓷样品在 193nm 深紫外光激发下的激发装置图及结果。图 5 (a) 是实验所使用的装置示意图。陶瓷在 ArF 激光器的激发下, 产生发射光, 利用光纤式光谱仪对发射光谱数据进行采集并处理。图 5 (b) 展示

了实验结果,在光泵浦到的地方可以观察到白色的光斑。由于样品被白光荧光发射光照亮而呈现蓝色。

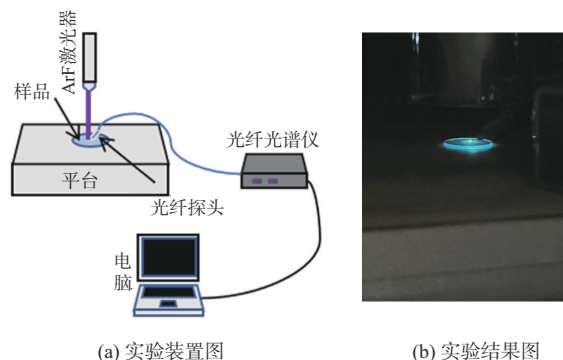


图5 0.02at% Co²⁺:YAG在深紫外下的实验示意图

0.02%at Co²⁺:YAG在193nm紫外光激发下的发射光谱如图6所示。可以看到在ArF准分子激光器的激发下,存在541nm的发射峰,该绿色发射峰归因于Co²⁺离子⁴A₂到⁴T₁(⁴P)的d→d跃迁,这是由于电偶极子机制引起的^[30]。在541nm旁边还

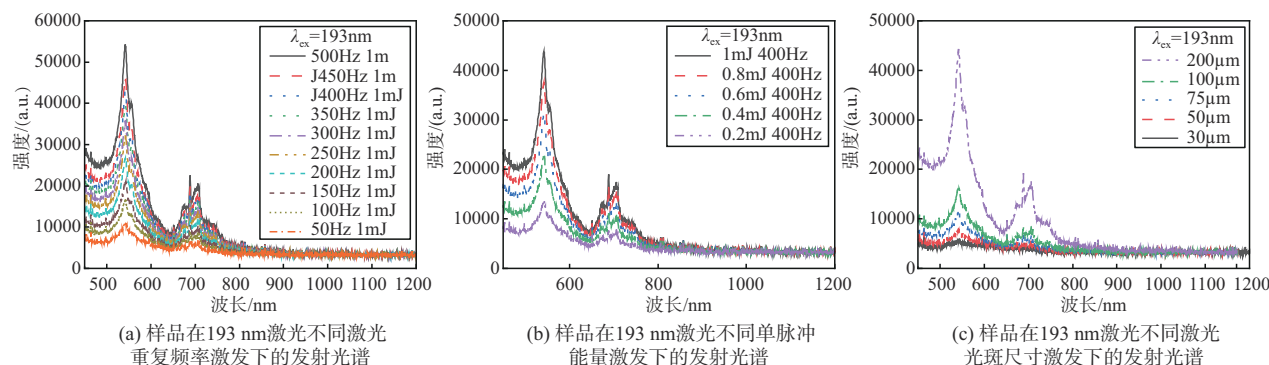


图6 0.02at% Co²⁺:YAG透明陶瓷样品在193nm深紫外准分子激光激发下的发射光谱

图7为样品在不同激光激发条件激发下,荧光光谱峰值强度线性度的拟合结果。从图7(a)可以看出材料对激光重复频率的响应具有良好的线性度,线性度系数为0.99。从图7(b)可以看出,材料对激光单脉冲能量的响应同样具有良好的线性度,线性度系数为0.99。从图7(c)可以

存在一个波长为680nm的红色发射峰,该发射峰可以归因于Co²⁺离子取代YAG晶格中四面体配位Al³⁺离子后的3d跃迁^[31,32]。

图6展示了0.02at% Co²⁺:YAG透明陶瓷样品在不同激光激发条件下的发射光谱变化。其中,图6(a)固定激光单脉冲能量为1mJ、光斑尺寸为200μm,研究了激光重复频率从50Hz增加到500Hz时样品发射光谱的变化。结果表明,随着激光重复频率的升高,样品的发射光强度显著增强,且在500Hz时达到最大值。图6(b)固定激光重复频率为400Hz、光斑孔径为200μm,研究了激光单脉冲能量从0.2mJ增加到1mJ时样品发射光谱的变化。实验结果显示,发射光强度随激光单脉冲能量的增加而增强,且在激光单脉冲能量为1mJ时,发射光强度最强。图6(c)固定激光重复频率为400Hz、激光能量为1mJ,研究了激光斑尺寸从30μm增加到200μm时样品发射光谱的变化。实验结果表明,发射光强度随光斑孔径的增大而增强,且在光斑尺寸为200μm时,发射光强度达到最大值。

看出,材料对激光斑孔径的响应线性度相对较差,但线性度系数仍然达到了0.98。实验结果表明,0.02at% Co²⁺:YAG透明陶瓷材料对于激光的激发条件(重复频率、单脉冲能量和光斑孔径)具有良好的线性响应特性,有助于实现对紫外能量的精确监测。

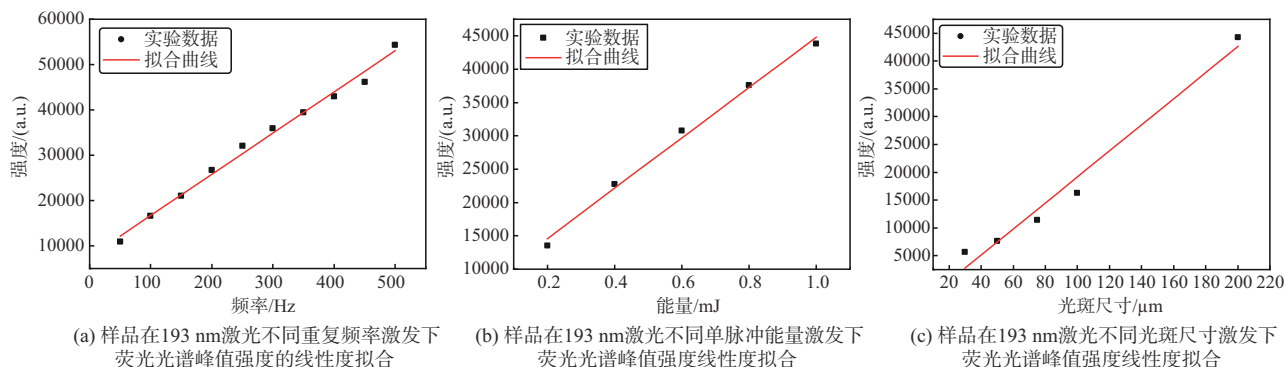


图7 0.02at% Co²⁺:YAG在193nm激光激发下荧光光谱峰值强度线性度拟合

由于探测器探测的信号是荧光发射光谱的积分强度,所以对样品在不同激光激发条件激发下的荧光光谱积分强度进行了拟合,如图8所示荧光光谱

积分强度相较于激光重复频率、激光单脉冲能量和激发光斑尺寸的拟合线性度分别为0.99、0.99和0.98,这与荧光光谱峰值强度的拟合结果类似。

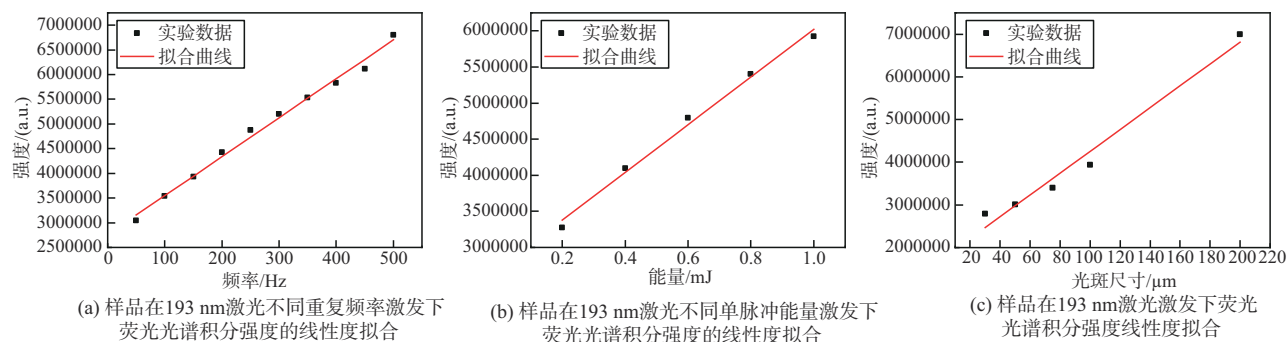


图8 0.02at% Co²⁺:YAG在193nm激光不同光斑尺寸激发下荧光光谱积分强度线性度拟合

3 结 论

采用高温固相法制备了二价钴离子掺杂的钇铝石榴石透明陶瓷(0.02at% Co²⁺:YAG),样品在400~800nm波长范围内(除吸收带外)的透过率大于70%。研究了0.02at% Co²⁺:YAG在深紫外激发下的荧光特性。利用ArF准分子激光器对样品进行激发,观察到样品呈绿色发射光和红色发射光,发射光谱的峰值波长为541nm和680nm,与当前常见的商用可见光探测器,如2051-FS-M硅探测器(探测范围300~1050nm)、HSPR-X-I-1G4-SI硅PIN光电探测器(探测范围320~1000nm)等的光谱范围匹配。在能量探测领域对于不同的应用场景对线性度有不同的精度要求,线性度大于0.97可以满足常规的应用场景^[33]。在不同激发条件(激光重复频率、激光单脉冲能量、激光光斑大小)下,0.02at% Co²⁺:YAG透明陶瓷均展现出优异的响应线性度,分别为0.99、0.99和0.98初步表明其在深紫外探测上的应用潜力。

参考文献:

- [1] Li Qiu, Shi Zhangli, Song Qingsong, et al. The micro-pulling-down growth of Tm:LuAG and Tm,Pr:LuAG crystals and optical properties[J]. Optical Materials, 2021, 118:1—5.
- [2] Tang Yang, Qiang Ming, Lou Wenhui, et al. Ga/Al ratio induced afterglow behavior of Ce³⁺:GAGG scintillation ceramics[J]. Ceramics International, 2024, 50(19):36286—36294.
- [3] Jiang Nan, Zhao Yu, Zhu Zhiwei, et al. Fabrication and laser performance of planar waveguide LuAG/Yb:LuAG/LuAG ceramics[J]. Optical Materials, 2019, 89:149—156.
- [4] Kamada K, Kurosawa S, Prusa P, et al. Cz grown 2-in. size Ce:Gd₃(Al, Ga)₅O₁₂ single crystal; relationship between Al, Ga site occupancy and scintillation properties[J]. Optical Materials, 2014, 36(12):1942—1945.
- [5] Liu Xin, Zhu Yuxuan, Cheng Ziqiu, et al. Spectrum regulation of YAG:Ce/YAG:Cr/YAG:Pr phosphor ceramics with barcode structure prepared by tape casting[J]. Journal of the

America-n Ceramic Society, 2024, 107:1061—1069.

- [6] Park S, Kim S, Kim S H. Temporal synchronization between two Q switched pulses in a 1×2 array distribution inside a single YAG/Yb:YAG/Cr:YAG laser resonator[J]. Optics Letters, 2023, 48:3211—3214.
- [7] 侯晴, 陈建玉, 齐红基, 等. Yb:YAG超快闪烁晶体研究进展与展望[J]. 发光学报, 2016, 37(11):1323—1331.
- [8] Hou Qing, Chen Jianyu, Qi Hongji, et al. Research progress and prospect of Yb-doped YAG ultrafast scintillation crystal[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(11):1323—1331.
- [9] Zhang Kan, Hu Huasi, Song Zhaohui, et al. Experiment investigation on pulsed gamma-ray fluence rate effect on Yb-doped yttrium aluminum garnet scintillator[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(6):1—7.
- [10] Huang Jin, Ni Yiran, Ma Yuelong, et al. Composite structure Cr:YAG/Ce:YAG and (Ce, Cr):YAG/Ce:YAG transparent ceramics with high color rendering index for white LEDs/LDs[J]. Ceramics International, 2021, 47(8):11415—11422.
- [11] Liu Zitong, Zhang Le, Kang Jian, et al. Barcode-structured YAG:Ce/YAG:Ce, Mn ceramic phosphors for variable CCT and high CRI LED/LD lighting[J]. Optics Express, 2023, 31:24914—24925.
- [12] 罗文飞, 张彬, 刘根, 等. Ce:YAG荧光陶瓷封装白光LED的出光特性分析[J]. 光学技术, 2014, 40(3):277.
- [13] Luo Wenfei, Zhang Bin, Liu Gen, et al. Study on photoluminescence properties of Ce-doping YAG fluorescent ceramics packaging white LED[J]. Optical Technique, 2014, 40(3):277—281.
- [14] Ottaway D, Harris J, Veitch P, et al. Short-pulse actively Q-switched Er:YAG lasers[J]. Optical Express, 2016, 24:15341—15350.
- [15] Harris L, Clark M, Veitch P, et al. Compact cavity-dumped Q-switched Er:YAG laser[J]. Optics Letters, 2016, 41:4309—4311.
- [16] Wang Sibao, Qu Bo, Tian Ye, et al. Cascade Er:YAG pulsed lasers at room temperature[J]. Optical Express, 2021, 46:5731—5734.
- [17] Lin Hongyi, Sun Dong, Copner N, et al. Nd:GYSGG laser at 1331.6 nm passively Q-switched by a Co:MgAl₂O₄ crystal[J]. Optical Materials, 2017, 69:250—253.

- [16] Ahmad J, Sabir M, Awan M Q, et al. Effect of Co^{2+} substitution on MgAl_2O_4 studied by infrared reflectance spectroscopy [J]. *Optik*, 2017, 147:180—186.
- [17] Satapathy L N. Effect of cobalt oxide on the densification of yttrium aluminum garnet [J]. *Materials Letters*, 2005, 59:387—390.
- [18] Szyslak A, Leśniewska-Matys K, Węglarz H, et al. Transparent cobalt-doped yttrium aluminum garnet (Co^{2+} :YAG) ceramics—An innovatory fast saturable absorber [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, 104:1204—1209.
- [19] Li Lin, Hong Minghui, Michael S, et al. Laser nanomanufacturing—State of the art and challenges [J]. *CIRP Annals*, 2011, 60 (2):735—755.
- [20] Anderson M, Kaufman G, Ediger A, et al. Formation mechanism of micro/nanoscale structures on picosecond laser pulsed processed copper [J]. *Materials Today Advances*, 2023, 19:1—14.
- [21] Wang Weiling, Chang Jinlin, Chen Lei, et al. A laser-processed micro/nanostructures surface and its photothermal deicing and self-cleaning performance [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 655:307—318.
- [22] Mendiña A P, Doval A F, Delmdahl R, et al. Pulsed 193 nm Excimer laser processing of 4H-SiC (0001) wafers with radiant exposure dependent in situ reflectivity studies for process optimization [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2023, 168:1—9.
- [23] Yang Liangliang, Wei Jiangtao, Ma Zhe, et al. The fabrication of micro/nano structures by laser machining [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(12):1—69.
- [24] Ma Yuan, Wang Sen, Wu Zhongshuai, et al. Photolithographic microfabrication of microbatteries for on-chip energy storage [J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, 17(105):1—28.
- [25] Guo Heng, Xie Jiawang, He Guangzhi, et al. A review of ultrafast laser micro/nano fabrication: material processing, surface/interface controlling, and devices fabrication [J]. *Nano Research*, 2024, 17:6212—6230.
- [26] Hao Jiandong, Li Ling, Gao Peng, et al. Deep ultraviolet detectors based on wide bandgap semiconductors: a review [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2023, 25(81):152—171.
- [27] Li Yuqiang, Zhong Wenbin, Zheng Wei, et al. Silicon nitride deep-ultraviolet photoconductive detector [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, 41:1316—1319.
- [28] Kazmi J, Abbas A, Young D J, et al. ZnO nanowire UV photodetectors: at the intersection of flexibility, biocompatibility, and visible blindness [J]. *Materials Today*, 2025, 82:139—180.
- [29] 杨林, 常金全, 胡摇, 等. 气孔率对陶瓷激光器性能影响及控制方法 [J]. *光学技术*, 2022, 48(2):189—194.
- Yang Lin, Chang Jinquan, Hu Yao, et al. Porosity's effect on the performance of ceramic laser and its control method [J]. *Optical Technique*, 2022, 48(2):189—194.
- [30] Rasdi N M, Fen Y W, Sheh Omar N A, et al. Effects of cobalt doping on structural, morphological, and optical properties of Zn_2SiO_4 nanophosphors prepared by sol-gel method [J]. *Results in Physics*, 2017, 7:3820—3825.
- [31] Mselmi F, Neffati A, Kammoun S. Theoretical investigation of the cathodoluminescence spectra of Co-doped ZnO nanowires [J]. *Journal of Luminescence*, 2018, 198:124—131.
- [32] Geburt S, Röder R, Kaiser U, et al. Intense intra-3d luminescence and waveguide properties of single Co-doped ZnO nanowires [J]. *Physica Status Solidi Rapid Research Letters*, 2013, 7(10):886—889.
- [33] Wu Chunjin, Peng Yihao, Wang Shaolong, et al. Hierarchical structural design towards stretchable strain sensors with ultra-high sensitivity and linearity [J]. *Science China Materials*, 2024, 67(7):2319—2328.