

Yb³⁺含量对 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷微观结构与性能的影响

刘子玉^{1,2}, 冯亚刚³, 刘 鹏¹, 胡 辰^{2,4}, 刘聪聪¹, 郑雯雯¹, 杨现锋¹, 李 江^{2,4}

(1. 长沙理工大学材料科学与工程学院, 长沙 410114; 2. 中国科学院上海硅酸盐研究所透明陶瓷研究中心, 上海 201899;
3. 河南工业大学材料科学与工程学院, 郑州 450001; 4. 中国科学院大学材料与光电中心, 北京 100049)

摘 要: 镱掺杂氧化镧(Yb:Lu₂O₃)透明陶瓷由于具有热导率高、抗热震性能优异、高吸收与发射截面和远低于熔点的制备温度等优势备受关注。本工作以共沉淀法合成的纳米粉体为原料, 采用真空预烧结合热等静压(HIP)后处理工艺制备了不同 Yb³⁺ 掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷, 系统研究了镱离子(Yb³⁺)掺杂量对粉体形貌与物相及陶瓷微观结构、光学质量、光谱特性和热学性能的影响。其中, 3%(Yb³⁺的摩尔分数)Yb:Lu₂O₃ 陶瓷直线透过率最佳, 在 1080 nm 处为 83.0%。不同陶瓷中 Yb³⁺ 的吸收系数与掺杂量呈线性相关, 可推断 Yb³⁺ 基本进入了 Lu₂O₃ 晶格; 且 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收和发射截面与单晶相当。室温下, 3%和 15% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的热导率分别约为 13.1 W·m⁻¹·K⁻¹ 和 11.6 W·m⁻¹·K⁻¹, 说明高浓度 Yb³⁺ 掺杂的 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷具有优良热学性能, 是非常有前景的 1 μm 高功率固态激光增益介质。

关键词: 镱掺杂氧化镧透明陶瓷; 镱离子掺杂量; 光学特性; 热学性能

中图分类号: TM174 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)09-3161-12

网络出版时间: 2026-08-20



1 μm 高功率固体激光在军事、医疗、工业加工、空间通信等领域具有广阔的应用前景。高功率激光器在工作运行过程中会产生巨大热量进入增益介质, 因此, 选择高热导率、高抗热震性、光谱特性优异的增益介质对实现高品质激光输出非常关键^[1-2]。激光增益介质由基质和激活离子组成。立方晶系氧化镧(Lu₂O₃)因具有高热导率、低热膨胀系数、低声子能量和宽透明范围等优势成为非常有竞争力的光学基质材料^[1-3]。当掺杂不同稀土元素时, 可调控 Lu₂O₃ 基质及发光离子的本征发光特性以满足特定应用需求^[4-7]。当掺杂三价稀土激活离子(RE³⁺)时, 由于 Lu₂O₃ 晶格稳定性和热学性能对 RE³⁺ 的敏感度低, RE:Lu₂O₃ 材料具有高热导率、高吸收和发射截面等优势, 在高功率固体激光器领域很有应用前景^[1,4]。目前, 多数工作报道了 RE:Lu₂O₃ 激光增益介质实现了高功率、高效率固态激光输出^[2,8]。实现 1 μm 激光输出的稀土激活离子主要是 Yb³⁺ 和 Nd³⁺, 其中, Yb³⁺ 掺杂的激光材料能实现高增益激光输出^[8-9]。在 RE:Lu₂O₃ 激光材料中, Yb:Lu₂O₃ 表现尤为突出, 由

于 Yb³⁺ 和 Lu³⁺ 的离子半径和质量非常接近, 理论上可保持高热导率, 被认为是 1 μm 高功率固态激光领域中极具潜力的增益介质^[10-11]。

Lu₂O₃ 单晶熔点高达 2490 °C, 其生长条件苛刻且成本高, 阻碍了 Lu₂O₃ 基激光晶体的发展, 透明陶瓷能够在远低于熔点温度下制备, 且制备周期短。因此, 倍半氧化物透明陶瓷的研究受到相关领域的广泛关注。目前, 透明陶瓷粉体合成方法包括在固相法^[12]、激光烧蚀^[13]、火焰喷雾合成^[14]和湿化学^[15-16]等, 陶瓷烧结主要是采用无压烧结^[17]及热压(HP)烧结、HIP 和放电等离子烧结(SPS)等压力辅助烧结工艺^[18-21]。2005 年, 日本电气通信大学的 Takaichi 等^[22]基于神岛化学公司制备的 3% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷首次实现了的激光输出。2010 年, 美国海军实验室^[23]采用共沉淀法合成了高纯的纳米粉体, 首次采用热压结合热等静压烧结制备出 10% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷, 在 1100 nm 处的直线透过率超过 80%, 非常接近理论透过率, 首次实现了输出功率超过 16 W、斜率效率高达 74% 的 1081 nm 激光

收稿日期: 2025-09-16。 修订日期: 2025-11-03。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(2402142); 湖南省自然科学基金青年项目(2024JJ6042)。

第一作者: 刘子玉(1991—), 女, 博士, 讲师。

通信作者: 杨现锋(1980—), 男, 博士, 教授;

李 江(1977—), 男, 博士, 研究员。

Received date: 2025-09-16. Revised date: 2025-11-03.

First author: LIU Ziyu (1991—), female, Ph.D., Lecturer.

E-mail: ziyuliu@csust.edu.cn

Correspondent author: YANG Xianfeng (1980—), male, Ph.D., Professor.

LI Jiang (1977—), Male, Ph.D., Professor.

E-mail: lijiaang@mail.sic.ac.cn; yangxfcsus@csust.edu.cn

输出。2019 年, Dong 等^[24]采用新型喷雾滴定共沉淀法合成纳米粉体, 然后采用真空预烧结合 HIP 后处理制备出 0.5% Yb:Lu₂O₃ 的细晶粒透明陶瓷(透过率 81.8%@1000 nm, $d=1$ mm)。同年, Yin 等^[25]采用相同制备工艺获得 3.3% Yb:Lu₂O₃ 细晶透明陶瓷, 在 600 nm 处透过率达 80%($d=3$ mm), 并实现斜率效率为 24.25、2.50 W 连续激光输出。2024 年, 作者所在团队采用共沉淀法合成纳米粉体, 经过真空预烧结合 HIP 后处理制备出高光学质量的 5% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷, 并实现斜率效率为 73.8%的准连续激光输出^[26]。研究人员采用不同工艺实现了 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷制备, 并获得了较高功率和效率激光输出^[1,21,27]。其中, 利用共沉淀法合成纳米粉体, 并采用真空预烧结合 HIP 后处理两步烧结是制备高透明倍半氧化物透明陶瓷的主流工艺, 但目前尚未有 Yb³⁺浓度对 Yb:Lu₂O₃ 粉体及陶瓷结构与性能影响的系统探究的相关报道。

在高功率激光的应用中, 会产生大量热进入激光增益介质使其温度升高并形成温度梯度, 从而产生热透镜现象以及其他不利的热效应, 导致激光光束质量下降、巨大能量损耗, 甚至材料破裂等, 故在高功率激光器中增益介质的热学性能对激光器热管理非常关键^[28–29]。因而 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的热学性能对其 1 μ m 高功率激光应用非常关键, 其中, 热导率是热学性能中的关键物理参数。尽管已经有文献报道了 Yb:Lu₂O₃ 单晶的热导率随 Yb³⁺浓度变化的拟合结果, 即增大 Yb³⁺掺杂量并不会导致热导率的下降, 然而仍缺乏实验上的验证。此外, 在 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷亦未有相关工作从实验上来验证上述结论。因此, 非常有必要开展 Yb³⁺浓度对 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷热导率影响的探究。在陶瓷增益介质中, 影响热导率的重要因素包括激活离子掺杂量、陶瓷孔隙率、晶粒尺寸、助剂等^[30–33]。此外, 离子掺杂量也可能影响陶瓷的致密化及微观结构, 继而影响其热学性能。

综上所述, 本工作以共沉淀合成的纳米粉体为原料, 采用真空预烧结合 HIP 后处理两步烧结工艺制备不同 Yb³⁺掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷, 系统探究 Yb³⁺掺杂量对陶瓷微观结构、光学特性和热学性能的影响。

1 实验

1.1 样品制备

氧化物原料包括商业粉体 Lu₂O₃ (99.999%, 质

量分数)、Yb₂O₃ (纯度为 99.99%), 沉淀剂为 NH₄HCO₃ (99.995%)、分散剂(NH₄)₂SO₄ (AR)及硝酸(G3, 69%)。采用正向共沉淀法在室温下合成 Yb:Lu₂O₃ 的前驱体: 将沉淀剂溶液逐滴加入含金属离子的混合硝酸盐溶液中进行反应, 金属离子混合溶液中加入有一定量硫酸铵(NH₄SO₄)作分散剂, 分散剂物质的量与金属离子总物质质量保持 1:1, 沉淀剂的物质的量与金属离子总物质的量比值为 4.8, 滴定速度为 3 mL/min, 滴定结束后陈化 3 h, 然后分别采用去离子水和乙醇洗涤沉淀产物各 3 次, 将前驱体至于 70 °C 烘箱中干燥 49 h, 采用 200 目筛网过筛后在马弗炉中进行煅烧, 根据前期研究工作^[34], 选择在 1050 °C 保温 4 h, 即获得不同掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 纳米粉体。随后将粉体经过干压成型(60 MPa)结合冷等静压成型(200 MPa, 保压 3 min)获得圆片素坯, 再将素坯经过 1500 °C 保温 2 h 真空预烧结合 HIP 后处理(1750 °C 保温 3 h, 176 MPa Ar)制备出不同 Yb³⁺掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷, 并将 HIP 陶瓷在 900 °C 空气退火 10 h 后, 双面抛光至 1.3 mm 进行光谱测试。部分退火透明陶瓷分别抛光到不同尺寸($\phi=10.0$ mm, $d=1.3$ mm) 和($\phi=5.5$ mm, $d<1.0$ mm) 测试热学性能。

1.2 样品表征

采用 X 射线衍射仪(XRD, D/max 2200 PC, Rigaku, 日本)分析前驱体和煅烧后氧化物粉体的物相, Cu K α_1 的波长 λ 为 0.154 18 nm。采用场发射扫描电子显微镜(FESEM, SU8220, Hitachi, 日本)观察粉体及陶瓷的微观结构, 粉体粒径采用激光粒度仪(Nanobrook OmniZeta, 美国)测量。Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的直线透过率和吸收谱由紫外–可见–近红外(UV–VIS–NIR)分光光度计测量(Carry-5000, Varian, 美国)。陶瓷的热扩散系数随温度的变化曲线由激光闪光法测得, 比热由差示扫描量热法(DSC)测得, 两者温度测试范围为室温至 500 °C。

2 结果与讨论

2.1 Yb³⁺掺杂量对 Yb:Lu₂O₃ 陶瓷组成与结构的影响

图 1 为合成的不同 Yb³⁺掺杂量(0~15%)Yb:Lu₂O₃ 前驱体的 FESEM 照片。由图 1 可见, 纯 Lu₂O₃ 的前驱体由类球形颗粒堆积组成, 颗粒尺寸范围介于几十至几百纳米; 掺杂有 Yb³⁺的前驱体由非常蓬松的层片状组成, 片状物厚度薄至纳米尺寸, 由图 1b~图 1e 可见, Yb³⁺的浓度对 Yb:Lu₂O₃ 前驱体形貌没

有明显影响。在稀土碳酸盐沉淀过程中,若聚集成晶核形成的微粒的聚集速度大于构晶离子按照一定顺序排列于晶格内的取向速度,所得沉淀即为非晶形^[35]。纯硝酸镨溶液中加入碳酸氢铵沉淀剂时,由于碳酸镨的 K_{sp} (溶度积)非常小,形成的碳酸镨晶核

聚集速度大于 Lu³⁺和 CO₃²⁻排列的取向速度,产生非晶形沉淀,获得球形颗粒产物。加入硝酸铽沉淀过程中会形成 2 种晶核,导致形成微粒的聚集速度小于构晶离子的取向排列速度,使得沉淀发生一定程度的取向结晶,形成层片状沉淀产物。

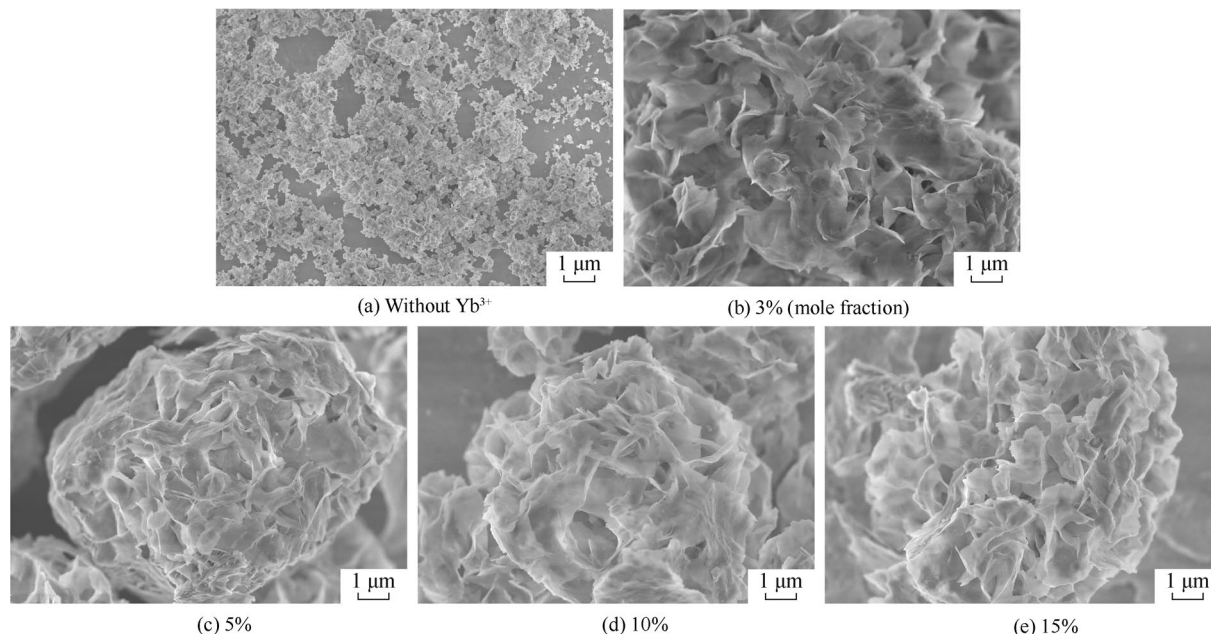


图 1 不同 Yb³⁺掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 前驱体的 FESEM 微观形貌

Fig. 1 FESEM micrographs of Yb:Lu₂O₃ precursors with different Yb³⁺ contents

将不同前驱体经过 1050 °C 保温 4 h 空气氛煅烧获得 Yb:Lu₂O₃ 粉体,其微观形貌如图 2 所示。由图 2a~图 2e 可见,纯 Lu₂O₃ 粉体由无序堆积的球形颗粒组成;Yb³⁺掺杂量为 3%、5%、10%和 15%的 Yb:Lu₂O₃ 粉体中纳米颗粒在二维空间上相互连接,保持一定层片结构;粉体颗粒多呈较为规则的多面体形状,其中部分颗粒间出现烧结颈,该现象比未掺杂粉体中更明显;相比未掺杂粉体,纳米颗粒球形度下降。由图 2f 可见,3%粉体的二次颗粒粒径最小,且粒径分布范围较窄;10%的粉体粒径分布范围最宽,且二次颗粒粒径最大;随着 Yb 浓度升高,测得 Yb:Lu₂O₃ 粉体的中位径 D_{50} 分别为:719、365、807、1340、676 nm。由 FESEM 照片可知,不同粉体的颗粒粒径基本介于几十纳米至一百多纳米范围,结合 2 种测试结果可知,3% Yb:Lu₂O₃ 粉体的团聚程度更低,分散性更好。分别选择 3%和 15% Yb:Lu₂O₃ 粉体进行了 EDS 元素面扫分析,由图 2h 可见,2 种不同浓度掺杂的氧化物粉体中,Yb 和 Lu 元素在整个粉体中均分布均匀,说明在共沉淀过程中,Yb 和 Lu 实现了同步沉淀。

图 3 为不同 Yb³⁺掺杂量的前驱体和经过煅烧后

获得的 Yb:Lu₂O₃ 纳米粉体的 XRD 谱。由图 3a 可见,未掺杂前驱体完全为无定形态,且衍射峰强度明显较其他前驱体的低,掺杂 3%、5%、10%和 15% Yb³⁺的前驱体 XRD 三强峰位置基本相同,其中,3%掺杂前驱体中还存在更多小的衍射峰,结晶性相对更低。图 3b 中不同 Yb:Lu₂O₃ 纳米粉体的衍射峰均与立方相 Lu₂O₃ 的 PDF 卡片(PDF 12-0728)一致,说明经过 1050 °C 煅烧后的粉体均转化成立方相氧化物;3% Yb:Lu₂O₃ 纳米粉体的 θ 衍射峰强度比其他粉体的更高,说明其结晶性更高,由此可知,Yb³⁺掺杂量并不影响 Yb:Lu₂O₃ 纳米粉体物相,但是对粉体结晶性会产生一定影响。对 XRD 数据进行 Rietveld 精修后,随着 Yb³⁺掺杂量的升高,3%、5%、10%和 15%晶胞参数依次约为 10.384 4、10.389 4、10.390 2、10.394 9 Å 和 10.396 5 Å,晶胞参数呈增大趋势,其原因是 Yb³⁺半径略大于 Lu³⁺半径;观察 29.7°附近的最强衍射峰,发现衍射峰存在向小角度偏移的现象,即晶胞参数增大,晶面间距增大,从而向小角度偏移。此外,根据谢乐方程计算了不同粉体的平均晶粒尺寸:

$$D_{\text{XRD}} = \frac{0.89\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

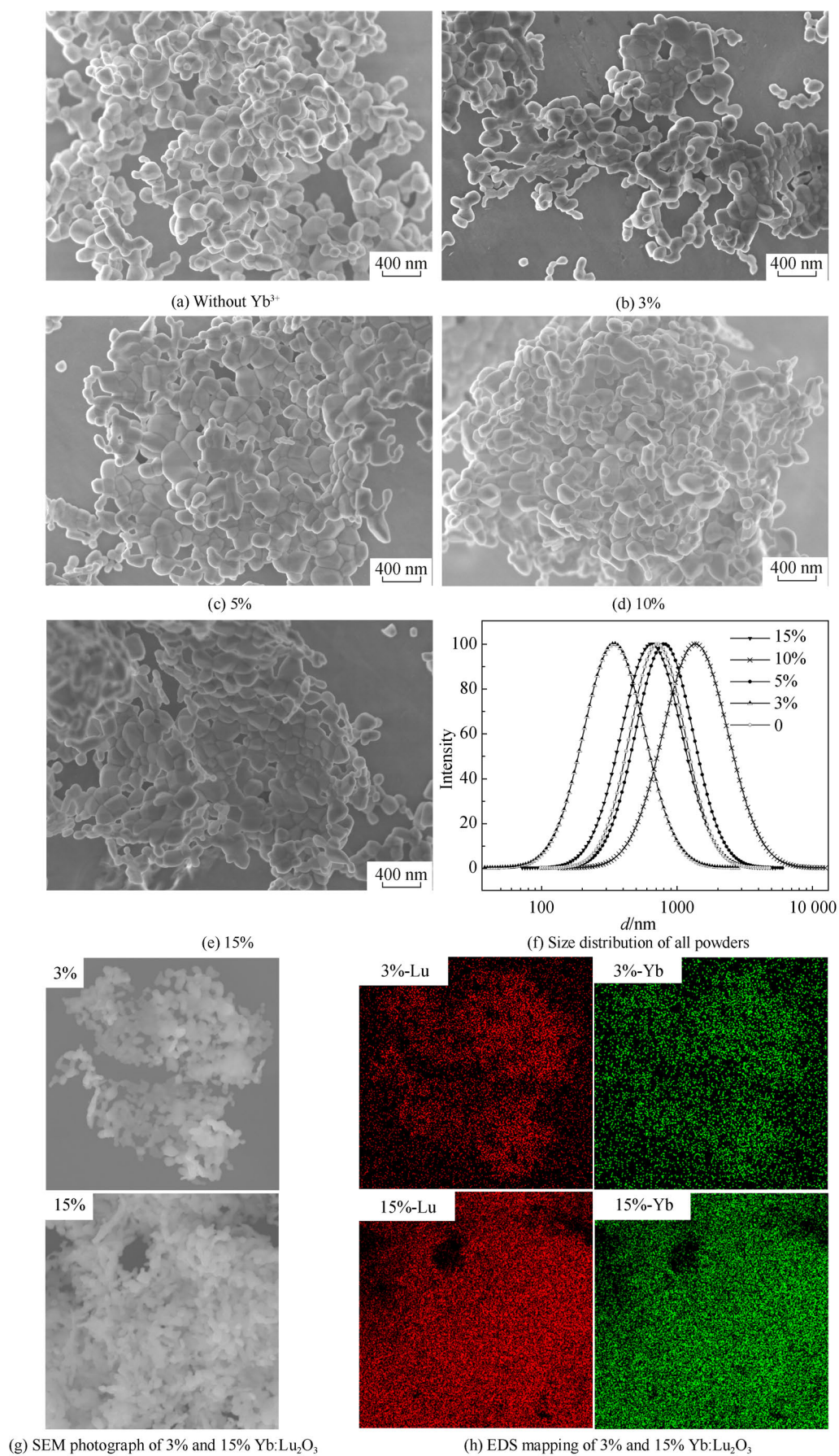


图 2 不同 Yb³⁺ 掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 纳米粉体的 FESEM 微观形貌、粒径分布及 EDS 面扫图
 Fig. 2 FESEM micrographs, size distribution and EDS mappings of Yb:Lu₂O₃ nano-powders with different Yb³⁺ contents

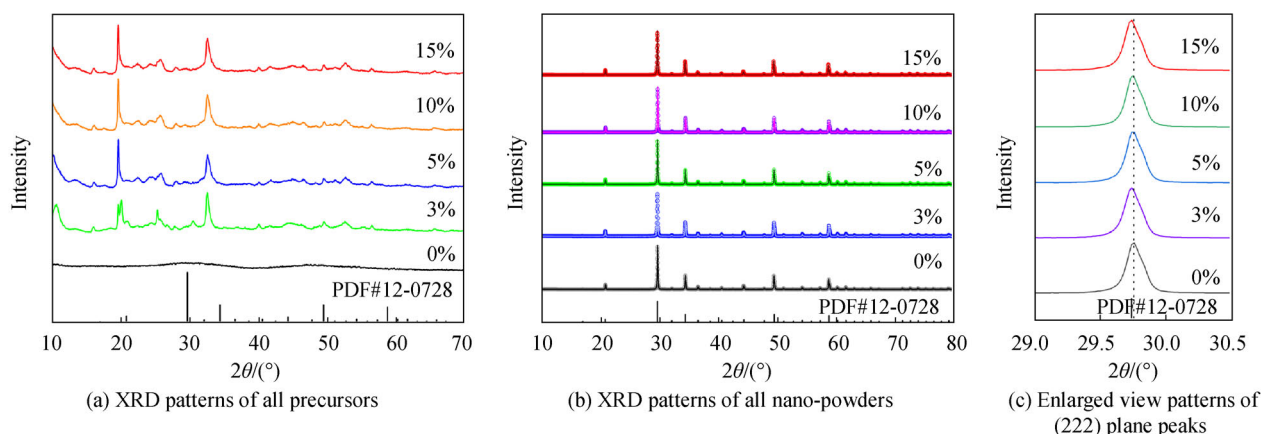


图 3 不同 Yb³⁺掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 前驱体和纳米粉体的 XRD 谱
Fig. 3 XRD patterns of Yb:Lu₂O₃ precursors and nano-powders with different Yb³⁺ contents

式中: λ 为 Cu K α_1 的波长; β 为布拉格角 θ 对应衍射峰的半高全宽(FWHM)。计算出来的粉体平均晶粒尺寸分别为 57.7、51.9、53.6、61.8 nm 和 51.4 nm, 显然, Yb³⁺浓度对纳米粉体的平均晶粒尺寸并没有产生明显影响。

将 Yb:Lu₂O₃ 素坯在真空环境中 1500 °C 保温 2 h 获得预烧陶瓷, 随着掺杂量增大, Yb:Lu₂O₃ 陶瓷相对密度分别为 95.3%、96.1%、95.6%、95.4% 和 95.7%, 对应气孔率分别为 4.7%、3.9%、4.4%、4.6%、4.3%。其中 3% Yb:Lu₂O₃ 预烧陶瓷的致密度最高。将预烧陶瓷抛光后在 1250 °C 保温 3 h 对抛光的陶瓷表面进行空气热腐蚀观察其表面微观结构, 如图 4 所示。不同 Yb³⁺掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 预烧陶瓷的

FESEM 照片可见表面均存在气孔, 大部分气孔聚集在晶粒的三叉晶界处, 图 4a 中未掺杂陶瓷表面气孔数量最多, 其气孔率也最高, 陶瓷中气孔形状呈多边形, 其中, 三叉晶界处的方形气孔尺寸最大达到 0.6 μ m, 平均孔径约为 0.35 μ m; 10% Yb:Lu₂O₃ 陶瓷表面的气孔尺寸比其他样品中更大, 其中气孔最大孔径达到 0.9 μ m, 平均孔径约为 0.57 μ m, 热腐蚀陶瓷表面的气孔形状呈多边形、圆形、三角形等多种形状; 3% Yb:Lu₂O₃ 陶瓷表面中气孔数量相对更少, 其气孔率也最低(3.9%)。采用截线法统计不同陶瓷的平均晶粒尺寸, 随着掺杂量增大, 其数值依次是 0.92、0.97、0.99、1.09 μ m 和 1.14 μ m, 说明在真空预烧过程中, Yb³⁺的掺杂能够促进晶粒生长。

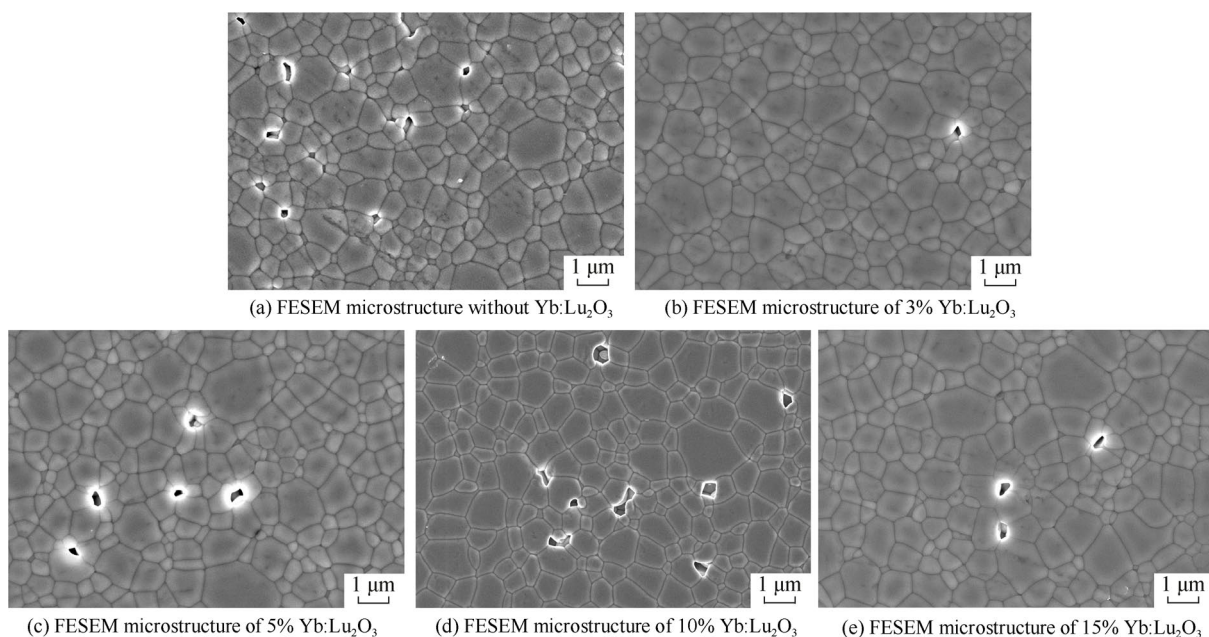


图 4 不同 Yb³⁺掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 预烧陶瓷表面的 FESEM 微观结构
Fig. 4 FESEM microstructures of surfaces of Yb:Lu₂O₃ pre-sintered ceramics with different Yb³⁺ contents

2.2 Yb³⁺掺杂量对 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷光学特性的影响

图 5 为不同 Yb³⁺掺杂量的 HIP 后处理 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的直线透过率曲线($d=1.3$ mm)及对应陶瓷断面的 FESEM 微观结构。由图 5 可见,3% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的透明度明显优于其他陶瓷, 其在整个测

试波段范围的直线透过率最高, 在 1080 nm 处约为 83.0%, 接近理论透过率(83.3%), 短波 600 nm 处为 78.8%。5%和 15% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷 800~1200 nm 波段范围的直线透过率非常接近, 在 1080 nm 处的直线透过率均超过 80%。在未掺杂的 Lu₂O₃ 陶瓷直线透过率最低, 在 1080 nm 处仅为 77.2%。Yb:Lu₂O₃

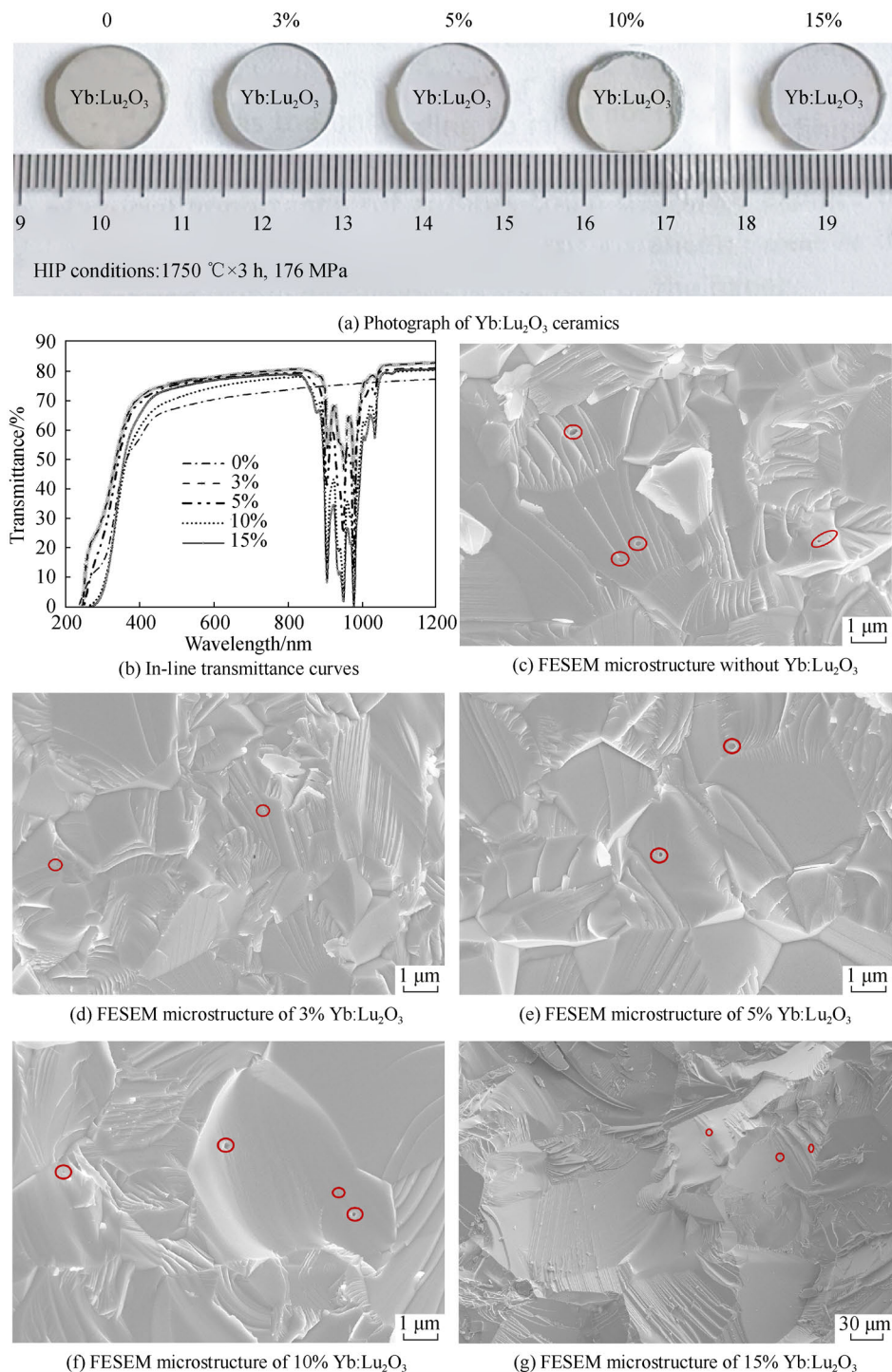


图 5 不同 Yb³⁺掺杂量的 HIP 后处理 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的直线透过率曲线($d=1.3$ mm)及对应陶瓷断面的 FESEM 微观结构
Fig. 5 In-line transmittance curves and FESEM microstructures of the corresponding ceramic fractures of Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics (1.3 mm thickness) with different Yb³⁺ contents

透明陶瓷的直线透过率并不随 Yb³⁺掺杂量升高成线性规律。不同 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷内部均存在纳米尺寸的晶内气孔, 这些气孔是导致陶瓷从 600 nm 向更短波长方向透过率下降的主要原因。未掺杂 Yb³⁺陶瓷中晶内闭气孔数量最多, 气孔多为球状, 尺寸也相对更大, 最大气孔直径约 220 nm。3%和 5% Yb³⁺掺杂陶瓷气孔数量更少。15% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷晶粒明显比其他陶瓷的更大, 原因是 HIP 过程中, 高 Yb³⁺浓度对晶粒生长促进作用更胜; 另一方面, 该预烧陶瓷中气孔尺寸较小, 陶瓷晶粒较大, 气孔对晶界迁移的阻碍更小, 即晶粒生长过程中气孔钉扎作用更弱。

对于 Yb³⁺掺杂激光增益介质, 基态 ²F_{7/2} 与激发态 ²F_{5/2} 能级之间的吸收和发射跃迁对于 1 μm 激光发射非常关键。根据吸收光谱的测量数据及下

面的计算公式计算出 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收系数 α :

$$\alpha = \frac{-2.303 \lg(I/I_0)}{d} \quad (2)$$

式中: I_0 为初始入射光强度; I 为入射光通过一定厚度陶瓷样品后的出射光强度; d 为陶瓷的厚度。

图 6 为不同 Yb³⁺掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收光谱特性。由图 6a 可见, 在 850~1050 nm 范围内共有 4 个主要的吸收峰, 分别位于 903、948、976、1032 nm, 这源于 Yb³⁺的基态能级 ²F_{7/2} 在晶体场中劈裂成多个 stark 子能级, 其中最强吸收峰位于零声子线 976 nm; 随着 Yb³⁺浓度增大, 吸收系数逐渐增强。由图 6b 可见, 吸收系数的大小与 Yb³⁺掺杂量大致呈线性相关, 与 Lambert-Beer 定律一致, 也说明 Yb³⁺已进入了 Lu₂O₃ 晶格。

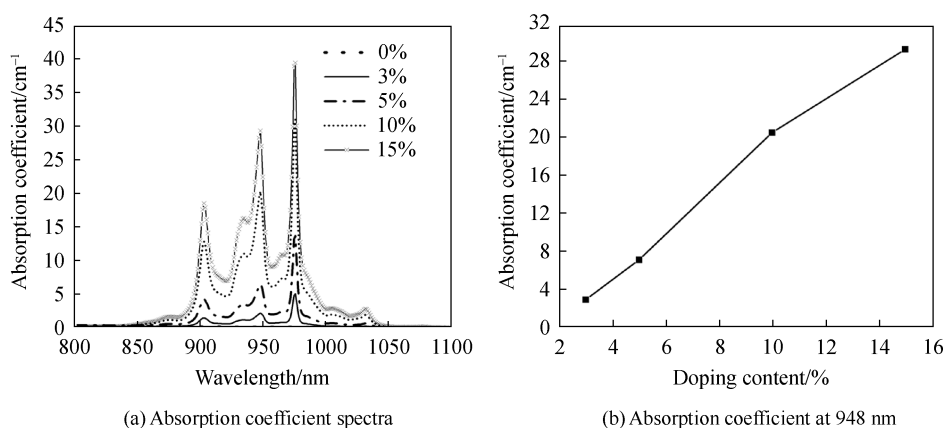


图 6 不同 Yb³⁺掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收光谱特性

Fig. 6 Absorption spectral characteristics of Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics with different Yb³⁺ contents

基于 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收系数谱, 根据式(3)和式(4)计算不同 Yb³⁺掺杂量陶瓷的吸收截面:

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{\alpha}{N} \quad (3)$$

$$N = \frac{\rho N_A}{M} \cdot C_d \quad (4)$$

式中: N 为单位体积内的掺杂离子数; ρ 为样品的理论密度; M 为 Yb:Lu₂O₃ 的摩尔质量; C_d 为掺杂量; N_A 为阿伏伽德罗常数。

图 7 为不同 Yb³⁺掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收截面及 10% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的光谱特性。由图 7a 可见, 在整个吸收谱范围内, 3%~10% Yb:Lu₂O₃ 陶瓷的吸收截面基本重合, 在 976 nm 的吸收截面约为 $1.08 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。但在 976 nm 处 15% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收截面略低于其他 3 个样品, 这是由于在 976 nm 处的吸收系数太高, 已经超

出设备的检出限。由于 3%~10% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收截面几乎重合, 因此, 如图 7b 所示, 选择了 10% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收截面, 采用倒易法计算其发射截面 σ_{em} :

$$\sigma_{\text{em}}(\lambda) = \sigma_{\text{abs}}(\lambda) \frac{Z_l}{Z_u} \exp \left[\left(\frac{hc}{kT} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{\text{ZL}}} - \frac{1}{\lambda} \right) \right] \quad (5)$$

$$Z_a = \sum_i d_i^a \exp \left(-\frac{E_i^a}{kT} \right) \quad (6)$$

式中: Z_l 和 Z_u 分别为下、上配分函数, Yb:Lu₂O₃ 材料中分别为 1.151 和 1.227; h 、 c 、 k 、 T 和 λ_{ZL} 依次是普朗克常量、光速、玻尔兹曼常数、开尔文温度(室温下取 300 K)和零声子线; d_i^a 为 E_i^a 的能级简并度, $a=u$ 或者 l 。 ²F_{5/2} → ²F_{7/2} 跃迁的发射光谱范围在 900~1100 nm, 有 4 个主要发射峰, 分别位于 948、976、1033、1079 nm。最大发射截面位于 976 nm,

约为 $1.148 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ，在 1033 nm 和 1079 nm 的发射截面分别为 $1.035 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 和 $0.378 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。

根据 10% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收和发射截面光谱，采用式(7)计算激光增益谱：

$$\sigma_g(\lambda) = \beta \sigma_{em}(\lambda) - (1 - \beta) \sigma_{ab}(\lambda) \quad (7)$$

式中： σ_g 为增益截面； λ 为波长； β 为粒子反转数(激光增益系数)。计算的增益曲线如图 7c 所示，可见最小的激光增益系数 β 约为 0.059，比 Yb:YAG(0.055)透明陶瓷的值高。当 β 大于 $\beta_{\min}$ 并逐

渐增大时，激光发射的中心波长从 1079 nm 移动至 1033 nm 处，且随着 β 增大，1033 nm 的激光发射逐渐占优势。其原因是 Yb³⁺ 掺杂的激光增益介质在 1 μm 附近产生激光发射的运行机制为准三能级机制(二能级)，当 β 较小时，周围大量基态粒子将发射的光子重新吸收掉，即较短波长范围吸收截面很大，随着 β 增大，基态离子数量显著减少，对该波长附近发射光子的重吸收减弱，从而能够逐渐形成激光发射。976 nm 处发射截面很大，但由于重吸收现象，无法产生激光发射。

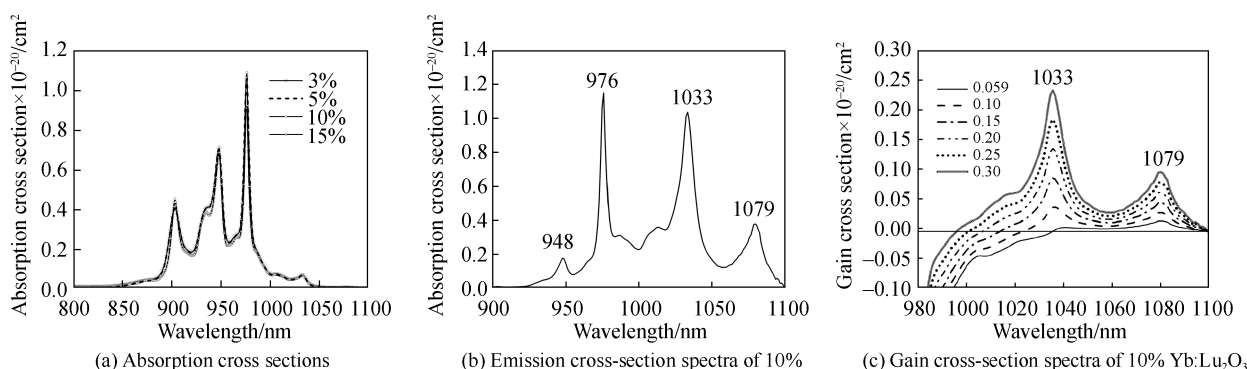


图 7 不同 Yb³⁺ 掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的吸收截面及 10% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的光谱特性

Fig. 7 Absorption cross sections of Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics with different Yb³⁺ content and spectral characteristics of 10% Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics

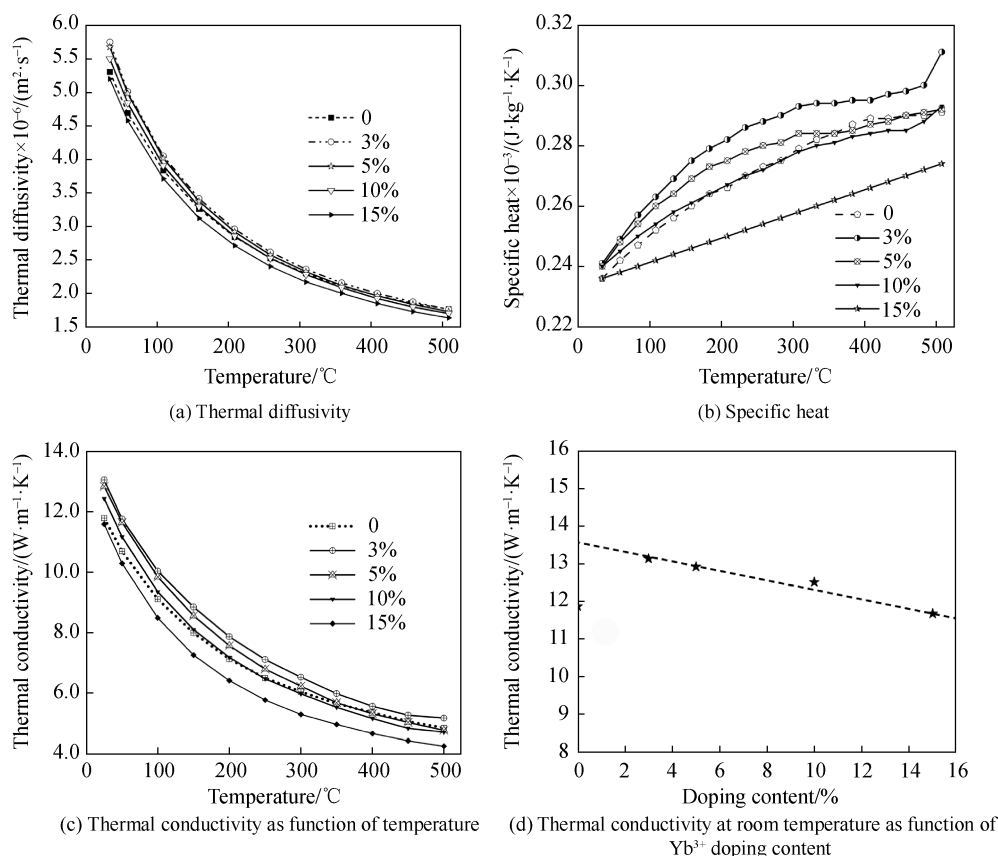
2.3 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的热学性能

图 8 为不同 Yb³⁺ 掺杂量 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的热学性能，其中，5% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的相关数据在文献[34]中已有报道。由图 8a 可见，当测试温度从室温逐渐升高到 500 °C 时，Yb:Lu₂O₃ 陶瓷的热扩散系数变化规律一致，从室温到 250 °C 急剧降低，随着温度升高，扩散系数下降趋势变缓。在相同温度下，3% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的热扩散系数最高，室温下约为 $5.75 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，其原因有 2 方面：掺杂量和更高的透明度。当 Yb³⁺ 掺杂量升高至 15% 时，热扩散系数下降较少，尤其是随着温度升高至 500 °C，掺杂量对热扩散系数的影响逐渐降低。图 8b 为不同 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的比热 C_p 随温度升高的变化情况。对于 0、3%、5% 和 10% Yb:Lu₂O₃ 陶瓷，随着温度升高，比热呈非线性增大，当温度超过 300 °C，比热逐渐稳定；纯 Lu₂O₃ 透明陶瓷的比热最低，主要原因是陶瓷中残留较多气孔而产生强声子散射。15% Yb:Lu₂O₃ 陶瓷的比热最低，且随着温度升高线性增加，比热随温度的变化规律完全不同于其他掺杂量的 Yb:Lu₂O₃ 陶瓷。

根据热扩散系数 D 和比热 C_p ，利用以下公式可计算 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的热导率 k ：

$$k = D \cdot \rho \cdot C_p \quad (8)$$

式中： ρ 为 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的理论密度。图 8c 为不同 Yb³⁺ 掺杂量 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的热导率随温度升高的变化情况。3% Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的热导率最高，室温下约为 $13.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ；本工作中 5% Yb:Lu₂O₃ 陶瓷室温下的热导率约为 $12.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，略高于文献报道相同浓度掺杂单晶的 $12.42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [36]。图 8d 为室温下 Yb:Lu₂O₃ 透明陶瓷的热导率随 Yb³⁺ 掺杂量变化曲线：文献报道中未掺杂单晶的热导率约为 $14.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [36]，根据拟合结果未掺杂 Lu₂O₃ 透明陶瓷的约 $13.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，接近 Lu₂O₃ 单晶的热导率。实际制备的 Yb:Lu₂O₃ 陶瓷热导率仅为 $11.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，主要由陶瓷中残留较多气孔导致强声子散射所致。此外，当 Yb³⁺ 掺杂量提高至 15%，陶瓷的热导率仍有 $11.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，高于纯 YAG 晶体的热导率($10.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) [37]。由上可知，高光学质量 Yb:Lu₂O₃ 陶瓷具有优异的热学性能，是非常有前景的高热导率激光增益介质。

图 8 不同 Yb^{3+} 掺杂量的 $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 透明陶瓷热学性能Fig. 8 Thermal properties of $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ transparent ceramics with different Yb^{3+} contents

3 结论

以共沉淀纳米粉体为原料, 采用真空预烧结合 HIP 后处理制备了不同 Yb^{3+} 掺杂量的 $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 透明陶瓷。系统探究了 Yb^{3+} 掺杂量对粉体和陶瓷组成和微观结构的影响。掺杂 Yb^{3+} 的前驱体由蓬松薄片状组成, 未掺杂前驱体则由无序堆积的球形颗粒组成。 $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 粉体由规则多面体颗粒组成, 3% $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 纳米粉体分散性更好。

不同 $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 透明陶瓷中, 3% $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 陶瓷的光学透过率最高, 1080 nm 处的直线透过率约为 83.0%。不同 Yb^{3+} 掺杂量的 $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 透明陶瓷在 948 nm 处的吸收系数与 Yb^{3+} 掺杂量大致呈线性相关, 其吸收和发射截面最大值均位于 976 nm 处, 分别为 $1.08 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 和 $1.148 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。当 β 超过 0.059 时, 产生 2 个激光发射峰, 分别位于 1033 和 1079 nm。

$\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 透明陶瓷的热导率变化与 Yb^{3+} 掺杂量的值非线性相关。3% $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 透明陶瓷的热导率最高, 室温下约为 $13.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 当掺杂量提高至 15%, 陶瓷热导率仍有 $11.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 说明

$\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 透明陶瓷具有优异的热学性能, 在高功率固体激光领域极具应用潜力。

参考文献:

- [1] LIU Z Y, IKESUE A, LI J. Research progress and prospects of rare-earth doped sesquioxide laser ceramics[J]. J Eur Ceram Soc, 2021, 41(7): 3895–3910.
- [2] 李江, 王皓, 齐建起. 透明陶瓷闪耀光技术的未来[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(3): 737–738.
- [3] LI Jiang, WANG Hao, QI Jianqi. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(3): 737–738.
- [4] FUKABORI A, CHANI V, KAMADA K, et al. Growth of Y_2O_3 , Sc_2O_3 and Lu_2O_3 crystals by the micro-pulling-down method and their optical and scintillation characteristics[J]. J Cryst Growth, 2011, 318(1): 823–827.
- [5] KAMINSKII A A, AKCHURIN M S, BECKER P, et al. Mechanical and optical properties of Lu_2O_3 host-ceramics for Ln^{3+} lasants[J]. Laser Phys Lett, 2008, 5(4): 300–303.
- [6] YE J H, WANG Y B, ZHOU Z Z, et al. Effect of Lu content on microstructure and spectral properties of $\text{Yb}:(\text{Lu}_x\text{Sc}_{1-x})_2\text{O}_3$ solid-solution sesquioxide transparent ceramics[J]. Opt Mater, 2025, 159: 116514.
- [7] WANG Y Z, JING W, LI W W, et al. Preparation of $(\text{Tb}_{0.94-x}\text{Lu}_{0.06}\text{Ho}_x)_2\text{O}_3$ transparent ceramics with high Verdet constants for magneto-optical applications[J]. J Adv Ceram, 2025, 14(3): 9221035.
- [7] 陈宇洋, 毕愿, 朱丹阳等. 不同掺杂量 $\text{Eu}_x\text{Lu}_{1.4-x}\text{Gd}_{0.6}\text{O}_3$ 透明陶瓷的

- 制备与性能[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(3): 828–835.
- CHEN Y Y, BI Y, ZHU D Y, et al. Preparation and performance of $\text{Eu}_x\text{Lu}_{1.4-x}\text{Gd}_{0.6}\text{O}_3$ transparent ceramics[J]. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(3): 828–835.
- [8] ESSER S, XU X D, WANG J, et al. Single-crystal and ceramic Yb: Lu_2O_3 gain media for thin-disk oscillators[J]. Appl Phys B, 2023, 129(10): 160.
- [9] WEICHELT B, WENTSCH K S, VOSS A, et al. A 670 W Yb: Lu_2O_3 thin-disk laser[J]. Laser Phys Lett, 2012, 9(2): 110–115.
- [10] PIRRI A, TOCI G, PATRIZI B, et al. An overview on Yb-doped transparent polycrystalline sesquioxide laser ceramics[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2018, 24(5): 1602108.
- [11] SANGHERA J, KIM W, VILLALOBOS G, et al. Ceramic laser materials[J]. Materials (Basel), 2012, 5(2): 258–277.
- [12] 穆浩洁, 张源江, 喻彬, 等. ZrO_2 掺杂 Y_2O_3 - MgO 纳米复相陶瓷的制备及性能研究[J]. 无机材料学报, 2025, 40(3): 281–289.
- MU Haojie, ZHANG Yuanjiang, YU Bin, et al. J Inorg Mater, 2025, 40(3): 281–289.
- [13] KUKO V S, MAKSIMOV R N, SHITOV V A, et al. Sintering of transparent Yb-doped Lu_2O_3 ceramics using nanopowder produced by laser ablation method[J]. J Alloys Compd, 2015, 643: 207–211.
- [14] BAKER C, KIM W, SANGHERA J, et al. Flame spray synthesis of Lu_2O_3 nanoparticles[J]. Mater Lett, 2012, 66(1): 132–134.
- [15] YE J H, ZHOU Z Z, HU C, et al. Yb: Sc_2O_3 transparent ceramics fabricated from co-precipitated nano-powders: Microstructure and optical property[J]. J Inorg Mater, 2025, 40(2): 215.
- [16] 刘焱, 覃显鹏, 甘霖, 等. 亚微米球形 Y_2O_3 粉体及其透明陶瓷的制备[J]. 无机材料学报, 2024, 39(6): 691–696.
- LIU Yan, QIN Xianpeng, GAN Lin, et al. J Inorg Mater, 2024, 39(6): 691–696.
- [17] XU P X, ZHOU Z L, WANG Y Q, et al. Sc^{3+} , Zr^{4+} double ions optimization of 5at.%Yb: Lu_2O_3 transparent ceramics by pressureless sintering in H_2 [J]. Ceram Int, 2025, 51(25): 46911–46917.
- [18] 李燕, 赵倩倩, 靖正阳, 等. 准等静压制备 ANbTeO_6 (A=K, Rb) 透明陶瓷的结构与光学性能[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(3): 836–844.
- LI Yan, ZHAO Qianqian, JING Zhengyang, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(3): 836–844.
- [19] SHIN Y B, HAM S B, KIM H N, et al. Novel transparent high-entropy sesquioxide ceramics with high physicochemical plasma etching resistance[J]. J Adv Ceram, 2025, 14(1): 9221013.
- [20] 刘子玉, 郑雯雯, 冯亚刚, 等. 不同掺杂量 Er: Lu_2O_3 透明陶瓷的制备与性能研究[J]. 人工晶体学报, 2024, 53(11): 1892–1900.
- LIU Ziyu, ZHENG Wenwen, FENG Yagang, et al. J Synth Cryst, 2024, 53(11): 1892–1900.
- [21] 李晴, 王俊, 马杰, 等. 倍半氧化物激光陶瓷的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(3): 1006–1022.
- LI Qing, WANG Jun, MA Jie, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(3): 1006–1022.
- [22] TAKAICHI K, YAGI H, SHIRAKAWA A, et al. Lu_2O_3 : Yb^{3+} ceramics—a novel gain material for high-power solid-state lasers[J]. Phys Status Solidi A, 2005, 202(1): R1–R3.
- [23] SANGHERA J, KIM W, BAKER C, et al. Laser oscillation in hot pressed 10% Yb^{3+} : Lu_2O_3 ceramic[J]. Opt Mater, 2011, 33(5): 670–674.
- [24] DONG L L, MA M Z, JING W, et al. Synthesis of highly sinterable Yb: Lu_2O_3 nanopowders via spray co-precipitation for transparent ceramics[J]. Ceram Int, 2019, 45(15): 19554–19561.
- [25] YIN D L, MA J, LIU P, et al. Submicron-grained Yb: Lu_2O_3 transparent ceramics with lasing quality[J]. J Am Ceram Soc, 2019, 102(5): 2587–2592.
- [26] LIU Z Y, FENG Y G, TOCI G, et al. Influence of annealing on microstructures and properties of Yb: Lu_2O_3 transparent ceramics[J]. J Am Ceram Soc, 2024, 107(3): 1974–1984.
- [27] ESSER S, XU X, ZHANG J, et al. kW-class ceramic Yb: Lu_2O_3 thin disk laser[C]//2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, Munich, Germany, OSA Technical Digest, 2021.
- [28] CHENAIS S, BALEMBOIS F, DRUON F, et al. Thermal lensing in diode-pumped ytterbium lasers-part I: Theoretical analysis and wavefront measurements[J]. IEEE J Quantum Electron, 2004, 40(9): 1217–1234.
- [29] 胡辰, 刘子玉, 罗伟, 等. 光学与光功能透明陶瓷的测试方法[J]. 现代技术陶瓷, 2025, 46(增刊 1): 286–326.
- HU Chen, LIU Ziyu, LUO Wei, et al. Adv Ceram, 2025, 46(Suppl 1): 286–326.
- [30] HOSTAŠA J, NEČINA V, UHLÍŘOVÁ T, et al. Effect of rare earth ions doping on the thermal properties of YAG transparent ceramics[J]. J Eur Ceram Soc, 2019, 39(1): 53–58.
- [31] WIEG A T, KODERA Y, WANG Z, et al. Thermomechanical properties of rare-earth-doped AlN for laser gain media: The role of grain boundaries and grain size[J]. Acta Mater, 2015, 86: 148–156.
- [32] YANG C L, HUANG J Q, HUANG Q F, et al. Optical, thermal, and mechanical properties of $(\text{Y}_{1-x}\text{Sc}_x)_2\text{O}_3$ transparent ceramics[J]. J Adv Ceram, 2022, 11(6): 901–911.
- [33] 利建雨, 李家麒, 马猛, 等. 烧结助剂 Li_2CO_3 对钽酸铋激光透明陶瓷热—力—光学性质的影响[J]. 现代技术陶瓷, 2024, 45(3): 268–278.
- LI Jianyu, LI Jiaqi, MA Meng, et al. Adv Ceram, 2024, 45(3): 268–278.
- [34] LIU Z Y, FENG Y G, CHEN H H, et al. Microstructure and properties characterization of Yb: Lu_2O_3 transparent ceramics from co-precipitated nano-powders[J]. Int J Appl Ceram Technol, 2023, 20(6): 3365–3375.
- [35] 李永绣, 黎敏, 何小彬, 等. 碳酸稀土的沉淀与结晶过程[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(1): 165–170.
- LI Yongxiu, LI Min, HE Xiaobin, et al. Chin J Nonferrous Met, 1999, 9(1): 165–170.
- [36] MUN J H, JOUINI A, YOSHIKAWA A, et al. Thermal and optical properties of Yb-doped Lu_2O_3 single crystal grown by the micro-pulling-down method[J]. J Ceram Process Res, 2013, 14(5): 636–640.
- [37] KLEIN P H, CROFT W J. Thermal conductivity, diffusivity, and expansion of Y_2O_3 , $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, and LaF_3 in the range 77°–300°K[J]. J Appl Phys, 1967, 38(4): 1603–1607.

作者贡献声明:

刘子玉: 论文构思、设计研究方法和实验方案、数据管理、分析/综合数据并推导结论、撰写初稿

冯亚刚: 调查研究、审阅与修订

刘 鹏: 审阅与修订

胡 辰: 审阅与修订

刘聪聪: 软件使用与验证

郑雯雯: 绘制图表

杨现锋: 监督指导、审阅与修订

李 江: 提供资源、获取资助、项目管理、监督指导、审阅与修订

Influences of Yb³⁺ Content on Microstructures and Properties of Yb:Lu₂O₃ Transparent Ceramics

LIU Ziyu^{1,2}, FENG Yagang³, LIU Peng¹, HU Chen^{2,4}, LIU Congcong¹, ZHENG Wenwen¹, YANG Xianfeng¹, LI Jiang^{2,4}

(1. School of Materials Science and Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Transparent Ceramics Research Center, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 4. Center of Materials Science and Optoelectronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Extended Abstract

Introduction Lutetium oxide (Lu₂O₃) transparent ceramics have a great potential in high-power or high-efficiency solid-state laser applications due to the excellent thermal-mechanical properties, low fabrication temperature, high absorption and emission cross-sections when doped with trivalent rare earth laser ions. Among them, Lu₂O₃ doped with Yb³⁺ stands out as the best combination for applications in high-efficiency and high-power lasers, considering a high thermal conductivity due to the similar ionic radii and bonding forces of lutetium and ytterbium ions. The combination of vacuum pre-sintering with HIP post-treatment, along with the powder synthesized by a co-precipitation method, highly favors to fabricate highly transparent sesquioxide ceramics. Some previous reports demonstrated the high efficiency and high power laser outputs of Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics. Thermal properties of Yb:Lu₂O₃ ceramics are significant for the high-efficiency and high-power laser applications. In ceramic gain media, the significant factors affecting the thermal conductivity include the doping content of active ions, porosity and grain size. Although increasing Yb³⁺ concentration could not cause a decrease in thermal conductivity in theory, little work has reported the related experimental investigations yet.

Methods The commercial oxide powders (*i.e.*, Lu₂O₃ and Yb₂O₃) were utilized as raw materials. Ammonium bicarbonate (NH₄HCO₃) and ammonium sulfate ((NH₄)₂SO₄) were used as a precipitant and a dispersant, respectively. The precursors of Yb:Lu₂O₃ were synthesized by a co-precipitation method. All the precursors with different Yb³⁺ doping contents were calcined at 1050 °C to obtain Yb:Lu₂O₃ powders, which were dry-pressed at a low pressure in a steel die and then cold-isostatically pressed at 250 MPa. All the green bodies were vacuum sintered at 1500 °C for 2 h to fabricate pre-sintered ceramics that then were HIP post-treated in Ar atmosphere pressure of 176 MPa at 1750 °C for 3 h. Finally, the HIP post-treated ceramics were annealed in air at 900 °C for 10 h and then polished on the both sides to a thickness of 1.3 mm for the coming optical characterizations. Some annealed transparent ceramic disks were then machined to the sizes of ($\phi = 10.0$ mm, $d = 1.3$ mm) and ($\phi = 5.5$ mm, $d < 1.0$ mm) for measuring the thermal diffusivity and specific heat, respectively.

The phase compositions of the synthesized precursors and powders were identified by X-ray diffraction (XRD, Cu K α 1 radiation, $\lambda = 0.154$ 18 nm). The microstructures of all the powders and ceramics were determined by field emission scanning electron microscopy (FESEM, SU8220, Hitachi, Japan). The in-line transmittance and absorption spectra of Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics were characterized by ultraviolet-visible-near infrared spectroscopy (UV-VIS-NIR, Carry-5000, Varian, USA). The thermal diffusivity was measured by a laser-flash method, and the specific heat was measured by differential scanning calorimetry (DSC).

Results and discussion Pure Lu₂O₃ precursor consists of spherical particles with various sizes, which range from tens of nanometers to hundreds of nanometers in diameter, but the micro-morphology of the precursor with Yb³⁺ is made of thin stacked layers with nano-sized thickness, indicating that Yb³⁺ doping has a great impact on the morphologies of Lu₂O₃ precursor, but its concentration level does not affect the morphologies of the precursors apparently. The particles of Yb³⁺-doped nano-powders agglomerate in two-dimensional space and are in the shape of regular polyhedra. The phases of all the calcined nano-powders are consistent with those of cubic Lu₂O₃. The lattice parameters of Yb:Lu₂O₃ nano-powders are 10.384 4、10.389 4、10.390 2、10.394 9 Å and 10.396 5 Å, respectively, with increasing the Yb³⁺ concentration. The corresponding average grain sizes are 57.7, 51.9, 53.6, 61.8 and 51.4 nm, respectively. The relative densities of all the Yb:Lu₂O₃ pre-sintered ceramics are 95.3%, 96.1%, 95.6%, 95.4% and 95.7%, with average grain sizes of 0.92, 0.97, 0.99, 1.09 μ m and 1.14 μ m, respectively, as Yb³⁺ concentration increases. 3% Yb:Lu₂O₃ transparent ceramic sample has the maximum in-line transmittance with the values of 83.0% at 1080 nm and 78.8% at 600 nm. The absorption coefficients at 948 nm of these ceramics are linearly correlated to Yb³⁺ doping content, which follows the Lambert-Beer Law. Four main emission peaks are located at 948, 976, 1033 and 1079 nm, respectively, among which the largest emission cross-section is at 976 nm with a value of 1.148×10^{-20} cm². The laser emission wavelengths include 1079 nm and 1033 nm. The maximum thermal conductivity of 3% Yb:Lu₂O₃ ceramics is $13.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ at room temperature, which is similar to the value of Yb:Lu₂O₃ single crystal, while the thermal conductivity of 15% Yb:Lu₂O₃ ceramics is $11.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, which is greater than that of pure YAG material. The result indicates that Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics are a gain medium with a high thermal conductivity, even doped with a high Yb³⁺ doping content, demonstrating a great application potential in high-power solid-state lasers.

Conclusions Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics with Yb³⁺ doping content of 0–15% were fabricated by vacuum sintering and HIP post-treating from co-precipitated nano-powders. The nano-powders calcined at 1050 °C had the similar particle sizes with different morphologies as the precursors. 3% Yb:Lu₂O₃ nano-powder showed a better dispersivity, and the corresponding transparent ceramics possessed the maximum optical quality with the in-line transmittance of 83% at 1080 nm. The spectral characteristics of all the Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics were calculated. At β of > 0.059, there were two main lasing emission wavelengths, peaked at 1033 nm and 1079 nm, respectively. 3% Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics possessed better thermal properties rather than others, with the room-temperature thermal conductivity of 13.1 W·m⁻¹·K⁻¹. The results indicated a great application potential of Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics in high-power solid-state lasers.

Keywords ytterbium-doped lutetium oxide transparent ceramics; ytterbium doping content; optical characteristics; thermal properties