

包边复合结构 Sm:LuAG/Nd:LuAG 激光陶瓷的 制备及性能研究

韩伟伟^{1,2}, 黄东², 李廷松², 李江^{2,3}

(1. 上海大学 微电子学院, 上海 201800; 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. 中国科学院大学 材料科学与光电工程中心, 北京 100049)

摘要: 在高功率的泵浦模式下, 热效应是限制激光器性能提升的主要因素之一, 通过增大增益介质的口径可以增强热量扩散, 从而降低热效应。然而, 随着增益介质的纵横比增大, 横向于主光束传播放大的自发辐射会消耗上能级反转粒子数, 产生寄生振荡效应。对增益介质侧面进行包边的结构设计, 能够有效吸收横向辐射光, 抑制寄生振荡效应。对于具有高重复频率的高能固体激光器, 应优先选择具有合适饱和通量的增益介质, 其中 Nd:LuAG 透明陶瓷因其优异的光学、机械和热力学综合性能, 展现出更大的发展潜力。Sm:LuAG 透明陶瓷在 1064 nm 处具有较高的吸收系数, 在 808 nm 处具有优异的理论光学透过率, 且与 Nd:LuAG 具有相近的折射率, 是应用于 Nd:LuAG 激光陶瓷包边层的最佳材料之一。本研究以商业 Lu_2O_3 、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 Nd_2O_3 及 Sm_2O_3 粉体作为实验原料, 采用正硅酸乙酯 (TEOS, Tetraethoxysilane) 和 CaO 作为烧结助剂, 经过真空预烧 (1825 °C × 20 h) 结合热等静压烧结 (1750 °C × 3 h) 制备了 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG (均为原子百分数) 包边复合激光陶瓷 ($\phi 56.0 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$)。包边陶瓷中 Nd:LuAG 增益区在 1064 nm 处的直线透过率达到 81.5%, Sm:LuAG 包边区在 808 nm 处的直线透过率为 78.6%。

关键词: 激光陶瓷; 包边复合结构; Sm:LuAG/Nd:LuAG; 显微结构; 光学性能

中图分类号: TQ174 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2026)01-0113-06

Sm:LuAG/Nd:LuAG Composite Laser Ceramics with Cladding Structure: Fabrication and Properties

HAN Weiwei^{1,2}, HUANG Dong², LI Tingsong², LI Jiang^{2,3}

(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, China; 2. Transparent Ceramics Research Center, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China; 3. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For high power lasers, the thermal effect imposes a limit on the power density dissipated inside the gain element, while it can be reduced by increasing the size of gain medium, which enhances heat dissipation. However, when aspect ratio of the gain medium increases, spontaneous fluorescence can be drastically amplified. Transverse propagation of spontaneous fluorescence induces amplified spontaneous emission, triggering detrimental parasitic oscillations. A promising solution involves applying cladding layers to the lateral surfaces of gain media to absorb stray radiation. For high repetition rate nanosecond high power solid-state lasers, it is essential to choose gain media

收稿日期: 2025-04-06; 收到修改稿日期: 2025-05-04; 网络出版日期: 2025-06-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB3812000) National Key R&D Program of China (2023YFB3812000)

作者简介: 韩伟伟 (1998-), 男, 硕士研究生. E-mail: hw18800205253@163.com

HAN Weiwei (1998-), male, Master candidate. E-mail: hw18800205253@163.com

通信作者: 李江, 研究员. E-mail: lijiaang@mail.sic.ac.cn

LI Jiang, professor. E-mail: lijiaang@mail.sic.ac.cn

with moderate saturation flux. Among these, Nd:LuAG transparent ceramics have shown significant potential due to their outstanding optical, mechanical, and thermodynamic properties. Additionally, Sm:LuAG transparent ceramics, with a high absorption coefficient at 1064 nm, excellent theoretical optical transmittance at 808 nm, and a refractive index similar to that of Nd:LuAG, have emerged as one of the best materials for cladding Nd:LuAG laser ceramics. Here, the 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG (in atom) cladding laser ceramics ($\phi 56.0 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$) using commercial Lu_2O_3 , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, Nd_2O_3 and Sm_2O_3 powders as raw materials were fabricated by vacuum pre-sintering at 1825°C for 20 h and HIP post-treatment at 1750°C for 3 h with TEOS and CaO as sintering additives. The in-line transmittance of the gain area is 81.5% at 1064 nm, while that of the cladding area is 78.6% at 808 nm.

Key words: laser ceramic; cladding composite structure; Sm:LuAG/Nd:LuAG; microstructure; optical property

高重复频率纳秒高能固体激光器具有高峰值功率、高平均功率、高重复频率等优点,能够更好地满足材料加工、激光雷达、医学治疗等应用需求,在工业、科研、国防、医学等众多领域中备受青睐^[1-3]。

对于具有较高重复频率的纳秒高能固体激光器的主放大级,常用的增益介质有 Nd:YAG、Yb:YAG、Nd:LuAG、钕玻璃和 Yb:S-FAP 等^[4-6]。对于具有高饱和通量的增益介质,如 Yb:YAG,其饱和通量约为 9.6 J/cm^2 ,接近膜系损伤阈值,易导致增益介质损坏和失效,同时其提取效率也严重受限。因此,为了提升效率,获得较高增益水平,需采用复杂光束系统和高亮度泵浦^[7-8]。而饱和通量约为 0.62 J/cm^2 的 Nd:YAG 为典型的低饱和通量增益介质,不适合应用于大能量脉冲激光放大链^[9],在此类系统中,单个增益介质的低储能会使整个激光系统中所需增益模块的数量显著增加,从而导致激光系统的高复杂性。此外,放大级数过多还会引入显著的静态损耗,显著降低系统效率。另一方面,对于钕玻璃和 Yb:S-FAP 而言^[10-11],其材料本身的热导率偏低,难以提高其重复频率。因此,对于具有高重复频率的纳秒高能固体激光器来说,应选择具有中等饱和通量的增益介质。考虑到光学性能、热力学性能、机械性能等综合性能,Nd:LuAG(饱和通量约为 1.9 J/cm^2)具有相对更大的发展空间和发展潜力^[12-15]。自日本 World-Lab 公司的 Ikesue 博士首次采用 Nd:YAG 透明陶瓷实现激光输出以来^[16],激光透明陶瓷被科研人员重点关注。激光陶瓷具有理论光学质量高、制备周期短、热导率高、能够实现激活离子的高浓度均匀掺杂和易于制备复合结构的特点^[17-21],是一种极具应用前景的增益介质材料。针对高功率激光输出的固体激光器,热效应成为限制激光器增益介质功率密度的主要因素。而通过增大增益介质的径向尺寸能够显著提高激光器的输出功率,同时提供更好的散热能力,并降低热透镜效应。

因此,大尺寸的盘片状激光增益介质就成为重复频率纳秒高能固体激光器的首选。但是当高功率的激光二极管用于泵浦大尺寸的盘片状激光增益介质时,将会产生放大自发辐射(Amplified spontaneous emission, ASE)和寄生振荡(Parastic oscillation, PO)。在功率相对较低的激光器中,ASE 效应并不是很显著,但随着泵浦功率的增加,ASE 效应会显著增强,这将对固体激光器增益介质的储能能力和输出功率产生严重影响。对增益介质侧面进行包边的复合结构设计,能够有效地吸收横向辐射光,抑制 ASE 和 PO 效应^[22-25]。

为了验证包边的结构设计对 PO 的抑制作用,德国汉诺威激光中心的 HuB 等^[26]分别制备了 4.0% Sm:YAG(原子百分数)包边和未包边的 1.0% Nd:YAG(原子百分数)陶瓷棒。采用泵浦波长为 808 nm、重复频率为 10 Hz 的激光二极管(LD)泵浦源分别测试其在准连续模式下的激光性能。包边复合结构 Sm:YAG/Nd:YAG 陶瓷实现了峰值功率为 636 W 的激光输出,光光转化率和斜率效率分别为 62.7%和 63.5%,高于未包边 Nd:YAG 陶瓷的激光性能(峰值功率 581 W、光光转化率 57.2%、斜率效率 57.7%)。通常包边材料需要具有激光发射波段合适的吸收系数、泵浦光波段优异的光学透过率、与增益介质相匹配的折射率以及与增益介质紧密结合等性能。对于石榴石基固体激光器,为了探究合适的高功率固体激光器增益介质用包边材料,日本神岛化学公司的 Yagi 等^[9]对不同金属离子掺杂(Sm^{3+} , Co^{3+} , Co^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{4+})的石榴石基透明陶瓷进行了吸收光谱的性能研究。研究发现, Cr^{3+} 和 Co^{2+} 掺杂的石榴石基透明陶瓷因其较低的吸收系数都不适合作为 Nd^{3+} 掺杂石榴石基激光陶瓷的包边材料,而 Co^{3+} 、 Cr^{4+} 及 Sm^{3+} 掺杂的石榴石基透明陶瓷在 1064 nm 处均表现出较强的吸收。但是 Cr^{4+} 在 808 nm 处也产生了较强的光学吸收,不利于侧面泵浦模式的应用。

此外, 由于 Co^{3+} 和 Al^{3+} 的离子半径相差较大, 难以制备高浓度 Co^{3+} 掺杂的石榴石基透明陶瓷。因此, 对于以 Nd:LuAG 陶瓷为增益介质的高能固体激光器^[27-29], Sm:LuAG 透明陶瓷是作为包边层最理想的材料之一。Sm:LuAG 透明陶瓷在 1064 nm 处具有高的吸收系数, 在 808 nm 处具有优异的理论光学透过率(约为 84.3%), 且与 Nd:LuAG 具有相近的光学折射率(约为 1.81), 是应用于 Nd:LuAG 激光陶瓷包边层的最佳材料之一。目前国内外对于 Sm:LuAG/Nd:LuAG 包边复合结构陶瓷研究较为缺乏, 而基于包边复合结构的激光陶瓷对提高重复频率纳秒高能固体激光器性能具有重要意义, 因此亟须对包边复合结构 Sm:LuAG/Nd:LuAG 激光陶瓷进行深入研究。

基于以上背景, 本研究采用高纯氧化物粉体作为实验原料, TEOS 和 CaO 作为烧结助剂, 通过真空预烧结合热等静压烧结(HIP)后处理制备了包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG(均为原子百分数, 下同)透明陶瓷, 并研究其微观结构和光学性能。

1 实验方法

1.1 材料制备

采用商业 Lu_2O_3 (99.99%, 上海斯年)、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (99.99%, 上海丰禾)、 Sm_2O_3 (99.99%, 上海斯年)和 Nd_2O_3 (99.99%, 上海斯年)粉体作为原料, TEOS(99.999%, Alfa Aesar)和 CaO(99.99%, Alfa Aesar)作为烧结助剂。将原料粉体与 0.6% TEOS 和 0.05% CaO(质量分数)混合后, 以无水乙醇为球磨介质, 采用氧化铝球在 130 r/min 转速下球磨 12 h。将球磨后的粉体在 80 °C 烘箱中干燥 4 h, 过 200 目(74 μm)筛。混合粉体经 600 °C 煅烧 4 h 后, 包边复合结构素坯采用 $\phi 75$ mm 的组合模具, 单轴干压成型, 然后进行冷等静压成型(250 MPa $\times$ 3 min)。陶瓷素坯的厚度约为 8 mm, 包边厚度即径向长度约为 12 mm。然后将素坯在 1825 °C 真空环境下烧结 20 h, 获得透明陶瓷, 随后在 1750 °C、200 MPa、氩气氛中进行 HIP 后处理 3 h 以提升光学质量。最后, 将复合结构激光陶瓷在 1400 °C 空气气氛中退火 10 h 以消除氧空位, 并镜面抛光至 4.8 mm 厚度以进行后续表征。

1.2 测试与表征

采用 X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD, D8Advance, Bruker, 德国)对所制备陶瓷进行物相

分析。采用场发射扫描电镜(Field emission scanning electron microscope, FESEM, SU8220, Hitachi, 日本)表征陶瓷的微观结构。采用紫外-可见-近红外分光光度计(UV-VIS-NIR spectrophotometer, Cary5000, Varian, 美国)测试透明陶瓷的直线透过率和吸收光谱。采用配备正交偏光镜的透光显微镜(Optical microscope, BX51, Olympus, 日本)观察透明陶瓷内部的气孔分布情况。采用低温吸收光谱仪(Cryogenic absorption spectrometer, CAS, FLS-980, Edinburgh, 英国)观察透明陶瓷的发射光谱。

2 结果与讨论

图 1 为真空预烧(1825 °C $\times$ 20 h)及 HIP 后处理(1750 °C $\times$ 3 h, 200 MPa)制备的包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷的 XRD 图谱。从图中可以看出, 所有陶瓷都具有单一的镧铝石榴石相, 未发现其他相。

图 2 为经过真空烧结(1825 °C $\times$ 20 h)的包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷的 FESEM 照片, 从图中可以看出, 包边陶瓷内部仍存在部分残余气孔。TEOS 作为烧结助剂在 1400 °C 左右开始

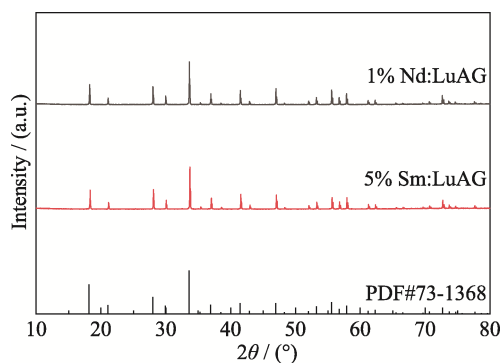


图 1 包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG cladding structure composite ceramics

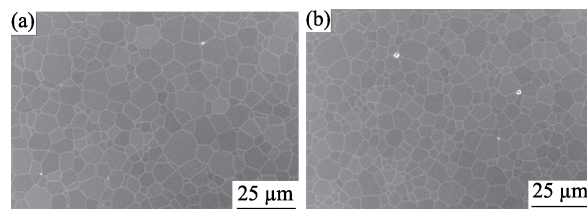


图 2 经 1825 °C $\times$ 20 h 真空预烧后 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 包边复合陶瓷的 FESEM 照片

Fig. 2 FESEM images of the 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG cladding structure composite ceramics pre-sintered at 1825 °C for 20 h (a) Gain area; (b) Cladding area

形成液相, 导致烧结过程中离子扩散速率增加, 并促进陶瓷的致密化过程。此外, 由于溶质拖曳效应, 低掺杂量的 CaO 可以有效抑制烧结过程中的晶粒生长, 并防止晶粒异常长大。添加 TEOS 和 CaO 作为烧结助剂有效促进了包边陶瓷的致密化过程, 并抑制了晶粒的异常生长^[30-31]。包边陶瓷增益区和包边区的平均晶粒尺寸分别为 14.3 和 14.5 μm 。

图 3 为经过真空预烧(1825 $^{\circ}\text{C} \times 20 \text{ h}$)及 HIP 后处理(1750 $^{\circ}\text{C} \times 3 \text{ h}$, 200 MPa)的包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷的 FESEM 照片, 从图中可以看出, 增益区和包边区均呈现均匀致密的微观结构, 没有发现明显的气孔和杂质。在 HIP 过程中, 高温和高压是促进陶瓷内部残余气孔排出和完全致密化的主要驱动力。经过 HIP 后处理, 包边陶瓷的晶粒尺寸无明显长大, 增益区和包边区的平均晶粒尺寸分别为 14.4 和 14.8 μm , 这可能是由 HIP 后处理温度低于真空预烧温度所致。

图 4 为 HIP 后处理的包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷($\phi 56.0 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$)的实物照片及直线透过率曲线。从图中可以看出, 透过整块陶瓷可以清晰地看到其下方文字, 陶瓷内部不存在明显不均匀的芯层。Nd:LuAG 增益区的直线透过率在 1064 nm 处达到 81.5%; Sm:LuAG 包边区在 808 nm 处的直线透过率为 78.6%。

图 5 为经过真空预烧(1825 $^{\circ}\text{C} \times 20 \text{ h}$)及 HIP 后处理(1750 $^{\circ}\text{C} \times 3 \text{ h}$, 200 MPa)的包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷的光学显微镜照片。从图中可以看出, 陶瓷中仍存在部分光学散射中心, 可能是残余气孔。反应烧结法采用多种氧化物粉体为原料, 经过球磨破碎后, 混合粉体中仍存在部分大尺寸团聚体, 团聚体之间的大气孔在烧结过程中难以完全排出陶瓷内部。由于包边复合结构陶瓷的尺寸较大, 在干压及冷等静压成型过程中团聚颗粒之间仍难以紧密堆积, 容易形成残余气孔。同时, 由于采用高温长时真空烧结制备的 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷的晶粒尺寸较大, HIP 后处理可以排出陶瓷中的部分微气孔, 但晶内气孔和部分大的晶间气孔只是被压缩。退火过程中, 这些被压缩的气孔会发生膨胀, 形成新的光学散射中心, 从而降低了陶瓷的光学质量。

图 6 为 HIP 后处理的包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷的元素分布线扫描图。从图中可以看出, 由于 Nd^{3+} 的掺杂浓度较低, Nd 元素的信号变化较弱; 而 Sm 元素图像左半段的信号较弱, 右半段较强, 存在明显的交界面, 交界面处扩散宽度约为 200 μm 。

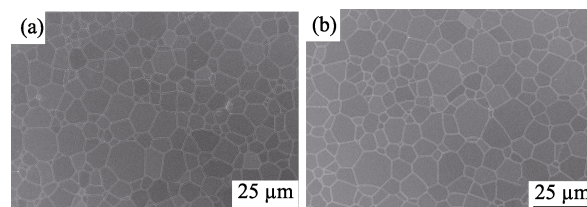


图 3 经 1825 $^{\circ}\text{C} \times 20 \text{ h}$ 真空预烧及 1750 $^{\circ}\text{C} \times 3 \text{ h}$ HIP 后处理的包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷的 FESEM 照片

Fig. 3 FESEM images of the 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG cladding structure composite ceramics pre-sintered at 1825 $^{\circ}\text{C}$ for 20 h and HIP post-treated at 1750 $^{\circ}\text{C}$ for 3 h

(a) Gain area; (b) Cladding area

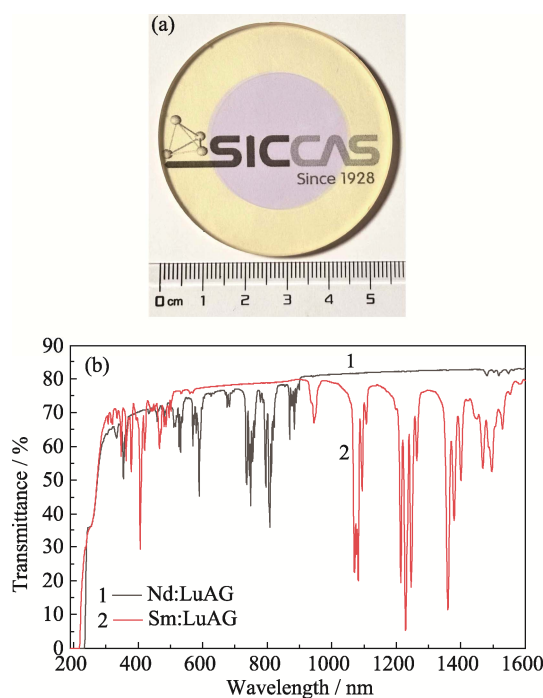


图 4 HIP 后包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷的实物图(a)及直线透过率曲线(b)

Fig. 4 Photograph (a) and in-line transmittance (b) of the 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG cladding structure composite ceramics after HIP post-treatment

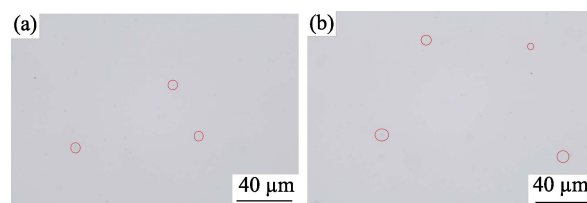


图 5 HIP 后包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷的光学显微镜照片

Fig. 5 Optical microscopic images of the 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG cladding structure composite ceramics after HIP post-treatment

(a) Gain area; (b) Cladding area

图 7 为包边复合结构陶瓷增益区 1% Nd:LuAG 的发射光谱, 其发射峰分别在 1053.1、1060.6、

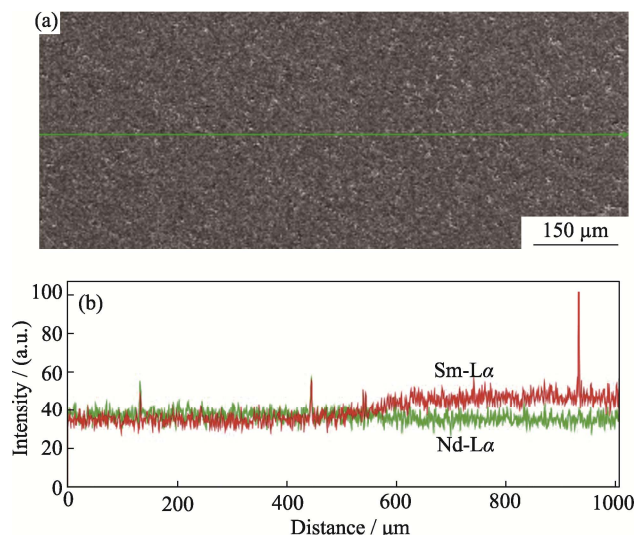


图 6 HIP 后包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷交界面的 FESEM 照片(a)和元素分布线扫描图(b)

Fig. 6 FESEM image (a) and linear scanning image (b) of the interface for the 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG cladding structure composite ceramics after HIP post-treatment

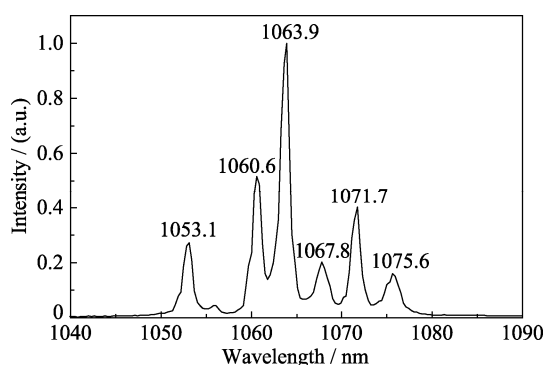


图 7 HIP 后包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷增益区在 1.06 μm 附近的发射光谱

Fig. 7 Emission spectrum of gain area around 1.06 μm for the 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG cladding structure composite ceramics after HIP post-treatment

1063.9 和 1071.7 nm。而相对常见的 Nd:YAG 四种对应的发射峰分别在 1051.8、1061.3、1064.0 和 1073.6 nm^[32]。两种之间的微小差异可能源于其晶格场与 Nd³⁺离子的能级相互作用。

图 8 为包边复合结构陶瓷包边区 Sm:LuAG 的吸收光谱。从图中可以看出, Sm:LuAG 陶瓷在近红外区有几个较强的吸收峰, 分别位于 1068、1226 和 1356 nm, 对应于 Sm³⁺的 $^6H_{5/2} \rightarrow ^6F_{9/2}$ 、 $^6H_{5/2} \rightarrow ^6F_{7/2}$ 、 $^6H_{5/2} \rightarrow ^6F_{5/2}$ 能级跃迁。Sm:LuAG 透明陶瓷在 1064 nm 处的吸收系数为 3.45 cm⁻¹。根据激光系统的设计要求, 从包边层返回光的容忍度应小于 0.2%。因此, 对于盘片状固体激光器, 其径向尺寸设计要求可根据公式(1)进行计算, 包边层对入

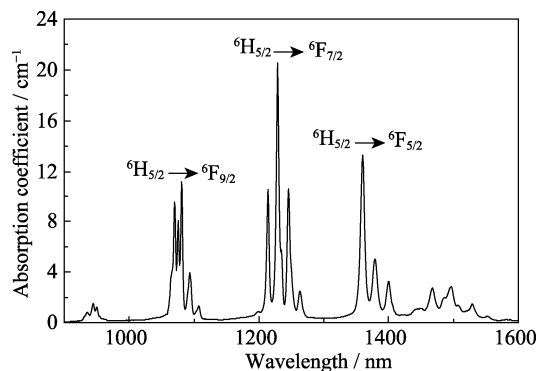


图 8 HIP 后包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 陶瓷包边区的吸收光谱

Fig. 8 Absorption spectrum of cladding area for the 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG cladding structure composite ceramics after HIP post-treatment

射光进行两次吸收后, 最终返回光的强度 T 如公式(1)所示:

$$T = Re^{-2\alpha L} \quad (1)$$

式中, R 为包边材料的反射率, α 为包边材料在自发辐射波长处的吸收系数, L 为包边材料的径向尺寸, e 为自然常数。LuAG 在 1064 nm 处的反射率可由公式(2)计算:

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2)$$

式中, n_1 是 LuAG 在 1064 nm 处的折射率, n_2 是空气的折射率。由此可以计算出 LuAG 的反射率为 8.5%。Sm:LuAG 陶瓷对入射光进行两次吸收后, 根据公式(1)计算出当返回光的强度 < 0.2% 时, 对于 5% Sm:LuAG 透明陶瓷, 包边层的径向长度应大于 5.4 mm 才能够实现对 ASE 的抑制作用。如果掺杂浓度低于 5%, 为了抑制横向 ASE 效应, Sm:LuAG 包边陶瓷的径向长度需求增加, 对于侧面泵浦模式来说将导致不必要的泵浦光损耗。如果掺杂浓度较高, 放大的自发辐射将在较短距离内被吸收, 可能导致发生热效应。

3 结论

本研究以商业 Lu₂O₃、 α -Al₂O₃、Sm₂O₃ 和 Nd₂O₃ 为原料, 添加 TEOS 和 CaO 为烧结助剂, 采用真空烧结(1825 °C×20 h)结合 HIP 后处理(1750 °C×3 h, 200 MPa Ar)制备了尺寸为 $\phi 56.0$ mm×4.8 mm 的包边复合结构 5% Sm:LuAG/1% Nd:LuAG 激光陶瓷。陶瓷增益区和包边区的微观结构均匀致密。Nd:LuAG 陶瓷增益区在 1064 nm 处的直线透过率为 81.5%, Sm:LuAG 陶瓷包边区在 808 nm 处的直线透过率为 78.6%。该研究为后续制备高光学质量的包边复合

结构激光陶瓷提供了思路, 对提升重复频率纳秒高能固体激光器的性能具有重要意义。

参考文献:

- [1] SPAETH M L, MANES K R, KALANTAR D H, *et al.* Description of the NIF laser. *Fusion Science and Technology*, 2016, **69**(1): 25.
- [2] BAYRAMIAN A, ACEVES S, ANKLAM T, *et al.* Compact, efficient laser systems required for laser inertial fusion energy. *Fusion Science and Technology*, 2011, **60**(1): 28.
- [3] DANSON C N, HAEFNER C, BROMAGE J, *et al.* Petawatt and exawatt class lasers worldwide. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, **7**(3): 172.
- [4] ZHU Z D, LV S W, ZHANG H Y, *et al.* Highly efficient actively Q-switched Nd:YAG laser. *Optics Express*, 2021, **29**(20): 32325.
- [5] BANERJEES, ERTEL K, MASON P D, *et al.* DiPOLE: a 10 J, 10 Hz cryogenic gas cooled multi-slab nanosecond Yb:YAG laser. *Optics Express*, 2015, **23**(15): 19542.
- [6] BROWND C, MCMILLEN C D, MOORE C, *et al.* Spectral properties of hydrothermally-grown Nd:LuAG, Yb:LuAG, and Yb:Lu₂O₃ laser materials. *Journal of Luminescence*, 2014, **148**: 26.
- [7] GONCALVES T, ALBACH D, VINCENT B, *et al.* 14 J/2 Hz Yb³⁺:YAG diode pumped solid state laser chain. *Optics Express*, 2013, **21**(1): 855.
- [8] 冯亚刚, 田丰, 刘子玉, 等. 层状复合结构 YAG/Yb:YAG 透明陶瓷的制备与性能研究. *人工晶体学报*, 2024, **53**(11): 1901.
- [9] YAGI H, BISSON J F, UEDA K, *et al.* Y₃Al₅O₁₂ ceramic absorbers for the suppression of parasitic oscillation in high-power Nd:YAG lasers. *Journal of Luminescence*, 2006, **121**(1): 88.
- [10] HAEFNER C L, BAYRAMIAN A, BETTS S, *et al.* High average power diode pumped petawatt laser systems a new generation of lasers enabling precision science and commercial applications. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10241**: 1024102.
- [11] LEBEGUE P, DE SOUSA J, RAPENOU C. Coherent combining of large-aperture high-energy Nd:glass laser amplifiers. *High Power Laser Science and Engineering*, 2025, **13**: 4.
- [12] RONG X F, YANG Y M, PENG S Z, *et al.* Sub-nanosecond diode-pumped passively Q-switched Nd:LuAG ceramic microchip lasers. *Optics & Laser Technology*, 2023, **158**: 108901.
- [13] FU Y L, LI J, LIU Y, *et al.* Fabrication, microstructure and laser performance of Nd³⁺-doped Lu₃Al₅O₁₂ transparent ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, **36**(3): 655.
- [14] LIU T H, FENG T, SUI Z, *et al.* 50 mm-aperture Nd:LuAG ceramic nanosecond laser amplifier producing 10 J at 10 Hz. *Optics Express*, 2019, **27**(11): 15595.
- [15] ZHANG W S, LI L J, LIANG H. Efficient acousto-optically Q-switched Tm:LuAG laser end-pumped by a laser diode at 1.7 μ m. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2025, **131**(3): 65.
- [16] IKESUEA, FURUSATO I, KAMATA K, *et al.* Fabrication of polycrystal line, transparent YAG ceramics by a solid-state reaction method. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, **78**(1): 225.
- [17] TIAN F, IKESUEA, LI J. Progress and perspectives on composite laser ceramics: a review. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, **42**(5): 1833.
- [18] LIU Z Y, FENG Y G, CHEN H H, *et al.* Microstructure and properties characterization of Yb:Lu₂O₃ transparent ceramics from co-precipitated nano-powders. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2023, **20**(6): 3365.
- [19] LI X Y, ZHANG L X, HU D J, *et al.* Fabrication and characterizations of Tb₃Al₅O₁₂-based magneto-optical ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2023, **20**(1): 493.
- [20] LI X, HU C, LIU Q, *et al.* Fluoride transparent ceramics for solid-state lasers: a review. *Journal of Advanced Ceramics*, 2024, **13**(12): 1891.
- [21] YE J H, ZHOU Z Z, HU C, *et al.* Yb:Sc₂O₃ Transparent ceramics fabricated from co-precipitated nano-powders: microstructure and optical property. *Journal of Inorganic Materials*, 2025, **40**(2): 215.
- [22] HUSS R, WILHELM R, KOLLECK C, *et al.* Suppression of parasitic oscillations in a core-doped ceramic Nd:YAG laser by Sm:YAG cladding. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 13094.
- [23] TIMOSHENKO A D, MATVIENKO O O, DOROSHENKO A G, *et al.* Highly-doped YAG:Sm³⁺ transparent ceramics: effect of Sm³⁺ ions concentration. *Ceramics International*, 2023, **49**(5): 7524.
- [24] WANG X, YU H, LI P, *et al.* Femtosecond laser-based processing methods and their applications in optical device manufacturing: a review. *Optics & Laser Technology*, 2021, **135**: 106687.
- [25] JI S H, HUANG W F, FENG T, *et al.* Modeling and measurement of thermal effect in a flashlamp-pumped direct-liquid-cooled split-disk Nd:LuAG ceramic laser amplifier. *Nature Photonics*, 2021, **8**(4): 97.
- [26] HUB R, WILHELM R, NEUMANN J, *et al.* Passively Q-switched core-doped ceramic Nd:YAG laser with Sm:YAG cladding. *Lasers and Electro-Optics*, 2007, **5**: 1303.
- [27] YAGI H, YANAGITANI T. Recent progress in transparent polycrystalline ceramics for optical applications. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, **39**(5): 300.
- [28] MA J, LU T T, ZHU X L, *et al.* 1.57 MW peak power pulses generated by a diode-pumped Q-switched Nd:LuAG ceramic laser. *Chinese Optics Letters*, 2017, **15**(12): 121402.
- [29] KONG W, TSUNEKANE M, TAIRA T, *et al.* Diode edge-pumped passively Q-switched microchip laser. *Optical Engineering*, 2015, **54**(9): 090501.
- [30] STEVENSON A J, LI X, MARTINEZ M A, *et al.* Effect of SiO₂ on densification and microstructure development in Nd:YAG transparent ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, **94**(5): 1380.
- [31] JING Y Q, TIAN F, GUO L H, *et al.* Effect of TEOS content on microstructure evolution and optical properties of Sm:YAG transparent ceramics. *Optical Materials*, 2024, **147**: 114681.
- [32] LIN Z, HUANG X, LAN J, *et al.* Efficient and compact diode-pumped Nd:YAG lasers at 1073 and 1078 nm. *IEEE Photonic*, 2016, **8**(2): 1500808.