

文章编号: 1000-7032(2023)02-0240-06

导模法生长Er:Lu₂O₃连续激光特性

张 萌^{1†}, 王贵吉^{2†}, 梁洋洋³, 苏纯云³, 贾文增³, 尹延如^{2*}, 李 涛^{1,3}

(1. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237; 2. 山东大学 晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100;

3. 山东大学 激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 导模法是一种超高熔点晶体的有效生长方法, 可以生长高质量、大尺寸、高掺杂的Er:Lu₂O₃晶体。本文测试了导模法生长的Er:Lu₂O₃晶体的荧光发射谱及连续激光特性, 在室温下获得了斜效率为23.1%的2.85 μm连续激光输出, 最高输出功率5.24 W。80 min功率RMS(Root mean square)稳定性优于1.4%, 不同输出功率水平的激光光束质量M²因子优于2.17。实验结果表明, 导模法生长的Er:Lu₂O₃激光晶体具备输出高功率、高效率中红外激光的能力。

关键词: 激光器; 固体激光器; 3 μm; Er:Lu₂O₃晶体

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20220324

Continuous-wave Laser Properties of Er:Lu₂O₃ Crystal Grown by EFG Method

ZHANG Meng^{1†}, WANG Guiji^{2†}, LIANG Yangyang³,
SU Chunyun³, JIA Wenzeng³, YIN Yanru^{2*}, LI Tao^{1,3}

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China;

2. State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China;

3. Key Laboratory of Laser & Infrared System (Shandong University), Ministry of Education, Qingdao 266237, China)

* Corresponding Author, E-mail: yyr@sdu.edu.cn

Abstract: As an excellent crystal growth method, the EFG (Edge-defined film-fed growth) method is excepted to grow Er:Lu₂O₃ crystal with high quality, large size and high doping concentrations. In this letter, the fluorescence spectrum and continuous-wave (CW) laser performances of Er:Lu₂O₃ crystal grown by EFG method have been characterized. A 2.85 μm CW laser with a slope efficiency of 23.1% was realized at room temperature, and the maximum output power was 5.24 W. The RMS (Root mean square) power stability is better than 1.4% during 80 min, and the M² factor of laser beam quality at different power levels is better than 2.17. The experimental results demonstrate that Er:Lu₂O₃ laser gain medium grown by EFG method has the ability to generate high output power and high efficiency mid-infrared laser.

Key words: laser; solid-state laser; 3 μm; Er:Lu₂O₃ crystal

1 引 言

中红外人眼安全3 μm波段光源可以被含羟

基(—OH)、碳氢键(C—H)、氮氢键(N—H)、硫氢键(S—H)的多种化合物强烈吸收^[1], 因此3 μm激光在医疗手术^[2-3]、气体监测^[4]、红外对抗^[5]等领域具

收稿日期: 2022-09-05; 修订日期: 2022-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(62105181, 62175132); 山东省自然科学基金(ZR2020MF116)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62105181, 62175132); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020MF116)

†: 共同贡献作者

有重要的应用价值。获得 3 μm 中红外激光技术手段包括但不限于非线性光学频率变换、半导体激光技术、量子级联激光技术、稀土离子或过渡金属离子掺杂全固态激光和光纤激光技术等^[6]。相较于通过非线性频率变换、半导体激光技术等手段,可以直接由半导体激光器(LD)泵浦产生 3 μm 的掺 Er³⁺ 固体激光器,因结构紧凑、成本低和转换效率高获得了广泛关注。表 1 总结了室温下 3 μm 波段 Er³⁺ 掺杂固体连续激光器主要研究进展。

表 1 室温下 3 μm 波段 Er³⁺ 掺杂固体连续激光器的输出性能

Tab. 1 The CW laser performance of the Er³⁺-doped solid state laser in 3 μm at room temperature

年份	激光晶体	掺杂浓度 (at.)/%	功率/W	斜效率/%	激光波长/μm
2012 ^[7]	Er:Lu ₂ O ₃	7	5.9	27	2.85
2014 ^[8]	Er:GGG	30	0.299	13.84	2.8
2018 ^[9]	Er:SrF ₂	3	1.3	9.2	2.75
2018 ^[10]	Er:YGG	10	1.38	35.4	2.82~2.92
2019 ^[11]	Er:YSGG	30	0.745	31.5	2.8
2020 ^[12]	Er:YAP	5	6.9	30.6	2.92
2020 ^[13]	Er:Lu ₂ O ₃	11	6.7	30	2.85

掺 Er³⁺ 固体激光器通过 ⁴I_{11/2} 到 ⁴I_{13/2} 能级跃迁产生 ~3 μm 激光,而泵浦波长为 0.97 μm,量子亏损严重,大量热沉积造成增益介质内部温度和应力分布不均,导致激光性能退化。热性能优异的基质材料是获得高光束质量、高稳定性中红外激光的关键因素。此外,中红外激光上下能级间带隙较窄,多声子弛豫制约着激光效率的提高,选择声子能量较低的基质材料可以有效地抑制声子弛豫带来的无辐射跃迁。氧化镧(Lu₂O₃)晶体具有高热导率(Er:Lu₂O₃在 30 °C下热导率为 13.28 W·m⁻¹·K⁻¹)^[14]和低最大声子能量(618 cm⁻¹)^[15],是非常有应用前景的中红外激光增益介质材料。然而,倍半氧化物晶体熔点极高(>2 400 °C),在如此高的生长温度下,很难找到合适的坩埚材料,单晶制备困难。

2020 年以来, Yin 等在 Er:Lu₂O₃ 单晶生长方面取得了突破性进展^[14,16],采用导模法定向籽晶技术生长了 Φ25 mm×30 mm 的 Er:Lu₂O₃ 单晶,晶体尺寸的突破为高功率中红外激光器的研制提供了基础。本文实验研究了 Yin 等采用导模法生长的 Er:Lu₂O₃ 晶体的发射谱特性和连续激光特性,在室温下获得了斜效率为 23.1% 的 2.85 μm 连续激光输出。

其中,在 2012 年,德国汉堡大学采用热交换法生长 Er:Lu₂O₃ 晶体,在 971 nm 半导体激光器泵浦下,获得了 5.9 W 的 2.85 μm 连续激光输出^[7]。2020 年, Yao 等采用 Er:YAP 作为增益介质获得了 6.9 W 的连续激光输出,斜效率 30.6%^[12],紧接着该课题组又采用 Er:Lu₂O₃ 陶瓷获得了 6.7 W 的连续激光输出^[13]。值得注意的是,从表格中可以观察到掺杂浓度较低^[7,9-10,12-13]的激光晶体较于掺杂浓度较高^[8,11]的激光晶体具有相对较好的激光性能。

2 晶体的光谱学性质及连续激光特性

2.1 晶体的光谱学特性

采用 976 nm 光源抽运,用英国 Edinburg 公司 FLS920 型号的荧光谱仪在室温下测量 Er:Lu₂O₃ 晶体荧光发射光谱,测试步长为 5 nm,样品双面抛光处理,掺杂浓度为 6.54% (at.),尺寸为 4 mm×4 mm×1 mm,发射谱如图 1 所示。用 976 nm 光源抽运的 Er:Lu₂O₃ 晶体在 1 400~3 300 nm 范围

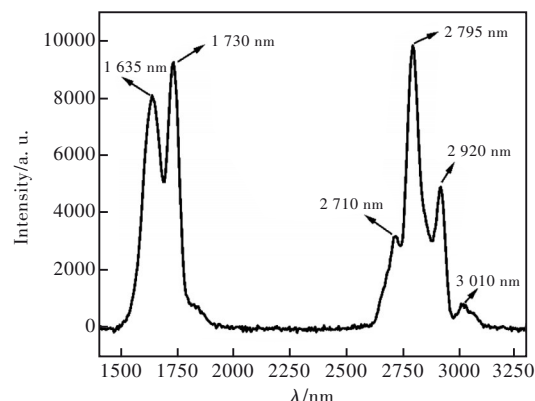


图 1 室温下 Er:Lu₂O₃ 晶体的发射谱

Fig.1 Emission spectrum of Er:Lu₂O₃ crystal at room temperature

内有两个荧光波段 1.65 μm 和 2.8 μm , 分别对应 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 和 $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 能级跃迁。由于晶格场的斯塔克效应, 荧光谱在 1.65 μm 分裂成两个明显的谱峰, 分别为 1 635 nm 和 1 730 nm; 在 2.8 μm 则分裂成 4 个明显的谱峰, 分别为 2 710, 2 795, 2 920, 3 010 nm, 其中在 2 795 nm 处的峰值最高。

2.2 连续激光实验

基于 $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 晶体的 LD 泵浦的高功率固体激光器实验装置如图 2。增益介质为 3 mm \times 3 mm \times 10 mm 的 $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 晶体, 掺杂浓度为 6.54% (at.), 在 3 μm 波段折射率约为 1.883^[15] 且端面均做了抛光处理。为了处理晶体的热效应, 将晶体侧面包裹铜箔 (0.05 mm) 后安装在 L 型水冷铜块中并保持温度在 13.5 $^{\circ}\text{C}$ 。输入镜 (IC) 是曲率半径为 10 000 mm 的凹面镜, 在 960~990 nm 波段有抗反射涂层, 在 2 700~2 900 nm 有高反射率涂层。输出镜 (OM) 分别采用了在 2 650~2 950 nm 透过率为 1%、3%、5% 且对 960~990 nm 高透的平面镜。为了减少空气中水分子对激光的吸收损耗, 晶体和两个腔镜紧密放置, 受限与镜架结构, 整个腔长约为 13 mm。整个系统由瀚宇公司最大功率为 60 W 的 VL5M-980-B 多模泵浦源泵浦, 泵浦光输出采用光纤耦合方式, 耦合光纤的直径为 105 μm 。L1 和 L2 为准直聚焦耦合系统, 泵浦光通过 L1 准直, 由 L2 聚焦耦合进 $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 晶体。L1 和 L2 均采用在 650~1 050 nm 波段有抗反射涂层的 K9 平凸透镜。为了准确测量激光的功率, 在输出镜后放置一个 45 $^{\circ}$ 的二向色镜 (DM) 将激光和未被吸收的泵浦光分离。DM 在 950~1 000 nm 波段有抗反涂层, 在 2 650~2 950 nm 波段有高反涂层。

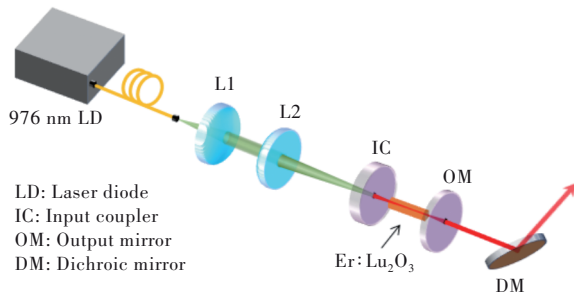


图 2 实验装置图

Fig.2 Experimental setup

为了获得最优的激光输出特性, 本实验采用不同耦合比的透镜组 (L1, L2) 以及不同透射率的输出镜开展连续激光实验。在 35:175 的耦合比

下, 使用 COHERENT 公司型号为 PowerMax-USB PM150-50 的功率计测量了泵浦光经过耦合透镜组及输入镜后在晶体前后的功率值, 得到晶体对泵浦光的吸收效率~91.78%。图 3 为激光输出功率在不同条件下随吸收泵浦功率变化的实验结果, 表明输出功率随吸收的泵浦功率线性增加。输出镜透射率为 3%, 耦合比分别为 35:200 (焦距 $f_1=35$ mm, $f_2=200$ mm)、35:175 ($f_1=35$ mm, $f_2=175$ mm)、35:150 ($f_1=35$ mm, $f_2=150$ mm)、35:100 ($f_1=35$ mm, $f_2=100$ mm) 和 50:100 ($f_1=50$ mm, $f_2=100$ mm) 的实验结果如图 3(a) 所示。相应地, 泵浦光光腰直径经耦合系统扩束后分别为 600, 525, 450, 300, 210 μm 。当耦合比为 35:100 时获得最佳的激光斜效率, 为 22.3%, 对应泵浦光的瑞利长度约为 5.5 mm, 与晶体长度 (10 mm) 高度匹配。为了获得最优的斜效率, 在最佳的耦合比 (35:

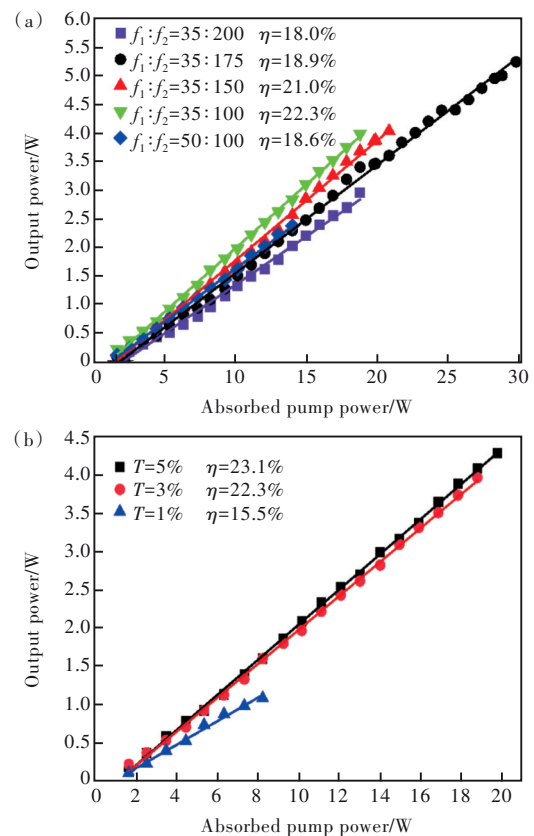


图 3 连续激光输出功率随吸收泵浦功率变化。(a) 透射率 $T=3\%$, 耦合比分别为 35:200, 35:175, 35:150, 35:100, 50:100; (b) 耦合比为 35:100, 透射率 $T=5\%$, 3%, 1%。

Fig.3 The variation of CW laser output power versus the absorbed pump power. (a) $T=3\%$, $f_1:f_2=35:200$, 35:175, 35:150, 35:100, 50:100. (b) $f_1:f_2=35:100$, $T=5\%$, 3%, 1%.

100)下更换了透过率分别为 1% 和 5% 的输出镜。输出功率如图 3(b)所示,在透过率为 5%、耦合比为 35:100 的条件下,获得了最高的激光斜效率,为 23.1%。图 3(a)中,在耦合比为 35:175、透射率为 3%、斜效率为 18.9%、吸收泵浦功率为 29.8 W 的条件下,获得了 5.24 W 的激光输出,此时晶体损伤,计算热损伤阈值为 $1.38 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, 优于日本生长的 Er:Lu₂O₃ 陶瓷^[13]。为保护晶体,后续实验均在低泵浦功率下完成。

在透射率为 5%、耦合比为 35:100 的条件下分别测量了光谱、激光光束质量及功率稳定性。使用 Thorlabs 公司的 OSA207C 傅里叶变换光谱分析仪测得了 Er:Lu₂O₃ 激光器在不同输出功率下的光谱。如图 4 所示,激光光谱的半高宽均在 0.5~1.3 nm 附近变化。当输出功率低于 0.58 W,可以观察到激光光谱仅出现在 2 720~2 740 nm 区域;随着输出功率从 0.58 W 增加到 1.13 W 时,激光在 ~2 845 nm 出现并逐渐占主导地位,同时激光在 2 740 nm 附近变弱并逐渐消失。可以看出,激光的发射波长随泵浦功率增加而发生了红移。这一现象产生的主要原因为:Er:Lu₂O₃ 激光晶体下能级寿命较长,在激光运转过程中下能级残余粒子对 2 720~2 740 nm 波段的激光存在激发态吸收作用^[7,17]。因此,随着泵浦功率的提高,长波长激光(~2 845 nm)在增益竞争中逐渐占据优势。

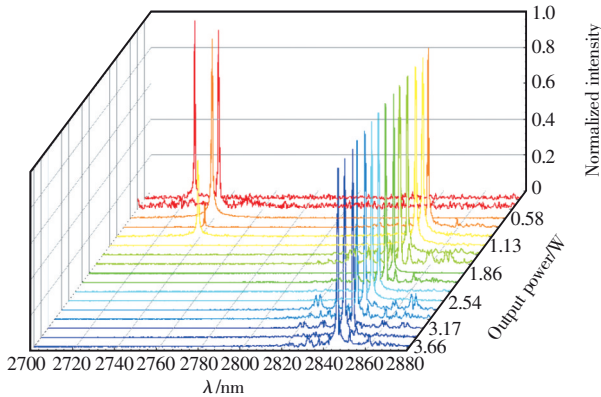


图 4 透射率 $T=5\%$ 、耦合比 $f_1:f_2=35:100$ 条件下激光波长随输出功率变化。
Fig.4 The laser wavelength varies with the laser output power of $T=5\%$ and $f_1:f_2=35:100$

在输出功率分别为 1, 2, 3 W 时,采用刀口法测量了光斑两个正交方向的光束质量因子 M^2 ,如图 5 所示。图 5(a)为 x 方向光斑直径随刀口位置的变化,图 5(b)为 y 方向光斑直径随刀口位置

变化。当输出功率为 1 W 时, $M_x^2=1.28, M_y^2=1.37$;当输出功率为 2 W 时, $M_x^2=1.24, M_y^2=1.81$;当输出功率为 3 W 时, $M_x^2=2.17, M_y^2=1.91$ 。可以看到,光束质量因子 M^2 随输出功率的增加而增大。输出功率的稳定性也是表征激光器性能的重要参数。使用 COHERENT 公司型号为 PowerMzx-USB PM10-19C 的功率计分别测试了不同输出功率水平的 80 min 稳定性,如图 6 所示,输出功率为

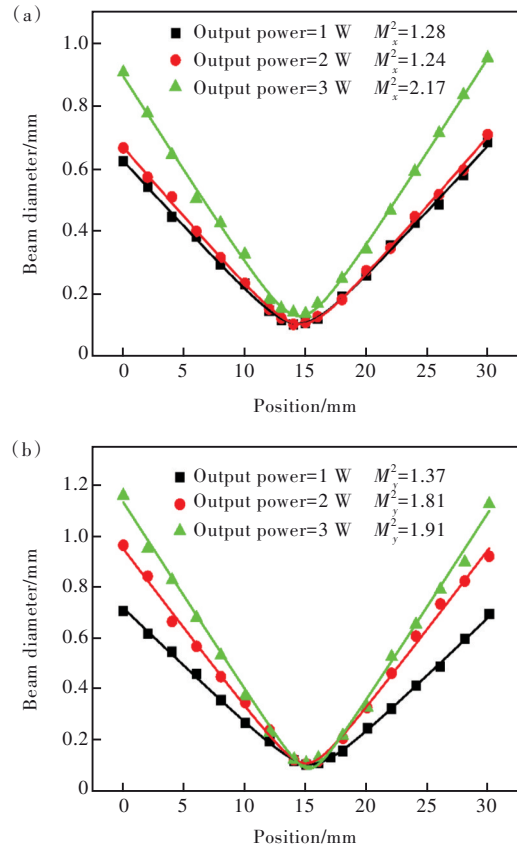


图 5 不同输出功率下光束质量因子 M^2 的测量结果。(a) x 方向;(b) y 方向。

Fig.5 Typical M^2 measurement results at different output power. (a) x direction. (b) y direction.

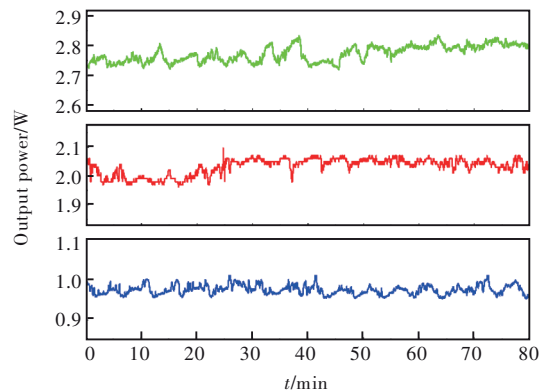


图 6 不同输出功率水平的功率稳定性
Fig.6 The power stability at different output power levels

0.97, 2.03, 2.77 W 的 RMS 稳定性分别为 1.18%、1.39%、0.96%。

3 结 论

本文以采用导模法生长的 Er:Lu₂O₃ 晶体作为增益介质,对其光谱学性质及连续激光性能进行了实验研究。在 976 nm 泵浦光的抽运下,测得了 Er:Lu₂O₃ 晶体在 1400~3300 nm 波段的荧光发射光谱。在泵浦光直径为 525 μm、输出镜透射率为 3% 的条件下,Er:Lu₂O₃ 晶体在 2.85 μm 产生了 5.24 W 连续激光输出功率,斜效率为 18.9%,对应吸收的泵浦光功率为 29.8 W。通过改变泵浦光斑直径以及更换透射率不同的输出镜,激光斜效率进一步提高到 23.1%,光束质量因子 M^2 优于 2.17,功率 RMS 稳定性优于 1.4%。本文首次采用国内自主生长的 Er:

Lu₂O₃(6.54%(at.))激光晶体,获得超 5 W 的 3 μm 连续激光输出。同时,本实验室使用德国热交换法制备的 Er:Lu₂O₃(7%(at.))激光晶体,在相同条件下获得了 8 W 以上输出功率,对比发现,国产激光晶体的发光性能相较国际水平仍存在较大差距。从激光晶体制备方面,应着力提高激光晶体制备质量,降低激光晶体散射截面,提高晶体损伤阈值;在激光器研发方面,应着力于设计使用散热性能更好的铜块,引入更加精准控温的 TEC(Thermo electric cooler)提高晶体热场均匀性。本文报道的研究工作对于实现高功率、高效率中红外激光器具有重要意义。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220324>.

参 考 文 献:

- [1] ROTHMAN L S, RINSLAND C P, GOLDMAN A, *et al.* The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1998, 60(5): 665-710.
- [2] TOOR F, JACKSON S, SHANG X M, *et al.* Mid-infrared lasers for medical applications: introduction to the feature issue [J]. *Biomed. Opt. Express*, 2018, 9(12): 6255-6257.
- [3] SKORCZAKOWSKI M, SWIDERSKI J, PICHOLA W, *et al.* Mid-infrared Q-switched Er:YAG laser for medical applications [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, 7(7): 498-504.
- [4] WOODWARD R I, MAJEWSKI M R, HUDSON D D, *et al.* Swept-wavelength mid-infrared fiber laser for real-time ammonia gas sensing [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(2): 020801-1-7.
- [5] JACKSON S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser [J]. *Nat. Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.
- [6] NIE H K, WANG F F, LIU J T, *et al.* Rare-earth ions-doped mid-infrared (2.7-3 μm) bulk lasers: a review [invited] [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2021, 19(9): 091407-1-13.
- [7] LI T, BEIL K, KRÄNKEL C, *et al.* Efficient high-power continuous wave Er:Lu₂O₃ laser at 2.85 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(13): 2568-2570.
- [8] YOU Z Y, WANG Y, XU J L, *et al.* Diode-end-pumped midinfrared multiwavelength Er:Pr:GGG laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2014, 26(7): 667-670.
- [9] ŠVEJKAR R, ŠULC J, JELÍNKOVÁ H, *et al.* Diode-pumped Er:SrF₂ laser tunable at 2.7 μm [J]. *Opt. Mater. Express*, 2018, 8(4): 1025-1030.
- [10] YOU L, LU D Z, PAN Z B, *et al.* High-efficiency 3 μm Er:YGG crystal lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(23): 5873-5876.
- [11] HU Q Q, NIE H K, MU W X, *et al.* Bulk growth and an efficient mid-IR laser of high-quality Er:YSGG crystals [J]. *CrystEngComm*, 2019, 21(12): 1928-1933.
- [12] YAO W C, UEHARA H, KAWASE H, *et al.* Highly efficient Er:YAP laser with 6.9 W of output power at 2920 nm [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(13): 19000-19007.
- [13] YAO W C, UEHARA H, TOKITA S, *et al.* LD-pumped 2.8 μm Er:Lu₂O₃ ceramic laser with 6.7 W output power and > 30% slope efficiency [J]. *Appl. Phys. Express*, 2021, 14(1): 012001-1-4.
- [14] 王贵吉, 尹延如, 贾志泰, 等. Er:Lu₂O₃ 单晶的导模法生长及性能表征 [J]. *人工晶体学报*, 2021, 50(4): 747-751.

- WANG G J, YIN Y R, JIA Z T, *et al.* Growth and property characterization of Er:Lu₂O₃ single crystals by EFG method [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2021, 50(4): 747-751. (in Chinese)
- [15] KRÄNKEL C. Rare-earth-doped sesquioxides for diode-pumped high-power lasers in the 1-, 2-, and 3- μ m spectral range [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2015, 21(1): 250-262.
- [16] YIN Y R, WANG G J, JIA Z T, *et al.* Controllable and directional growth of Er:Lu₂O₃ single crystals by the edge-defined film-fed technique [J]. *CrystEngComm*, 2020, 22(39): 6569-6573.
- [17] WANG L, HUANG H T, SHEN D Y, *et al.* Room temperature continuous-wave laser performance of LD pumped Er:Lu₂O₃ and Er:Y₂O₃ ceramic at 2.7 μ m [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(16): 19495-19503.



张萌(1997-),女,河南郑州人,硕士研究生,2019年于青岛科技大学获得学士学位,主要从事中红外固体激光器的研究。

E-mail: 202012728@mail.sdu.edu.cn



尹延如(1988-),女,山东济南人,博士,实验师,硕士生导师,2017年于山东大学晶体材料研究所获得博士学位,主要从事晶体生长及激光性能方面的研究。

E-mail: yyr@sdu.edu.cn



王贵吉(1995-),男,山东日照人,博士研究生,2018年于湘潭大学获得学士学位,主要从事倍半氧化物晶体的生长表征与稀土掺杂光谱性能的研究。

E-mail: wgj@mail.sdu.edu.cn