

Yb:YAG 陶瓷平面波导 1030 nm 激光放大

林伟平^{1,2,3}, 姜楠^{4,5}, 周唐建^{1,2}, 徐浏^{1,2}, 童立新^{1,2}, 尚建力^{1,2}, 汪丹^{1,2},
王君涛^{1,2*}, 赵玉⁴, 谢腾飞⁴, 李江^{4,5**}, 高清松^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

³中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088;

⁴中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201899;

⁵中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 将非水基流延成型和真空烧结技术制备的 YAG/Yb:YAG/YAG 平面波导陶瓷作为激光放大器的增益介质, 研究其激光放大特性。种子源为 1030 nm 保偏光纤激光器, 放大器的抽运源为 940 nm 半导体激光器阵列, 抽运光经过耦合后从端面进入平面波导。对比了前端抽运和后端抽运的放大性能, 测试了双端抽运的激光放大输出性能。在双端抽运下, 当注入种子光的功率为 136 W 时, 获得了功率为 1.41 kW 的激光输出, 斜率效率达到 41%。这是已报道的该类陶瓷平面波导达到的较高功率激光输出。

关键词 激光器; 激光放大器; 陶瓷平面波导; Yb:YAG

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0501002

1030 nm Laser Amplification of Yb:YAG Ceramic Planar Waveguide

Lin Weiping^{1,2,3}, Jiang Nan^{4,5}, Zhou Tangjian^{1,2}, Xu Liu^{1,2}, Tong Lixin^{1,2}, Shang Jianli^{1,2},
Wang Dan^{1,2}, Wang Juntao^{1,2*}, Zhao Yu⁴, Xie Tengfei⁴, Li Jiang^{4,5**}, Gao Qingsong^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

³Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;

⁴Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China;

⁵Center of Materials Science and Opto-Electronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A YAG/Yb:YAG/YAG ceramic planar waveguide is manufactured using tape casting combined with vacuum sintering and hot isostatic pressing, which is taken as the laser gain medium to investigate the characteristics of laser amplification. A 1030 nm polarization-maintained (PM) fiber laser is used as the seed laser and a 940-nm diode laser array is used as the pumping source of the amplifier. The pumping light is coupled with the planar waveguide from the end facets. Subsequently, the amplification performances under front-end-pumping and back-end-pumping are compared, and the amplification performances of dual-end pumping are experimentally tested. In case of dual-end pumping, when the seed laser power is 136 W, the laser output power is observed to be 1.41 kW and the slope efficiency is up to 41%. To the best of our knowledge, this is the superior output power worldwide for a laser with this type of ceramic planar waveguide.

Key words lasers; laser amplifier; ceramic planar waveguide; Yb:YAG

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.4480

收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61705209)、国家自然科学基金面上项目(61575212)

* E-mail: wjt_caep@126.com; ** E-mail: lijiaang@mail.sic.ac.cn

1 引 言

全固态激光器具有效率高、结构紧凑等优点,在科研、军事、工业制造等领域有良好的应用前景,在近十几年来获得了高速发展。实现高功率、高效率和高光束质量的激光输出是全固态激光器一直以来的发展目标,而热效应是限制固体激光器激光性能的主要因素之一。平面波导结构是光纤激光增益介质和板条激光增益介质的中间状态,它只产生一维的热流方向和热梯度,可以更有效地抑制热效应^[1-3]。因此,平面波导激光器在实现高效率大功率的激光输出方面具有较大的潜力。Filgas等^[4-5]采用Yb:YAG双包层平面波导作为增益介质,实现了功率为16.1 kW的激光输出,引起了研究人员的广泛关注,从此平面波导作为新型的激光增益介质获得了快速发展。Thomson等^[6]在新型非稳腔中用Yb:YAG平面波导获得了功率为400 W的激光输出,斜率效率高达75%。Wang等^[7]采用端面抽运Nd:YAG平面波导的方式,获得了最大功率为1.5 kW的激光放大输出,光-光转换效率达到49%。陈月健等^[8]将尺寸为1 mm×10 mm×60 mm的Nd:YAG平面波导作为增益介质,搭建平平腔实验装置,获得了最大单脉冲能量为928 mJ的激光输出,其光-光转换效率达到53.2%。

传统全固态激光器所用的增益介质材料主要是玻璃和晶体,玻璃由于热力学性能较差,不适用于高平均功率的激光系统,而激光晶体由于出色的热力学性能,被广泛应用于激光系统^[9-11]。激光陶瓷具有高温热力学性能良好、结构设计灵活及制备简单等优点而日益受到重视,被认为是21世纪最具有发展前景的激光材料之一。Ge等^[12]采用流延成型和真空烧结技术成功制备出高质量的陶瓷平面波导YAG/Nd:YAG/YAG。Lin等^[13]采用流延成型结合真空烧结技术制备出平面波导YAG/Nd:YAG/YAG,并获得最高输出功率为840 mW的激光输出。中国工程物理研究院应用电子学研究所的Liu等^[14]将流延成型结合真空烧结技术制备的平面波导YAG/Nd:YAG/YAG激光陶瓷作为激光放大器的增益介质,获得重复频率为100 Hz、单脉冲能量为327 mJ的激光输出。Wang等^[15]采用非水基流延成型法制备出平面波导YAG/Yb:YAG/YAG透明陶瓷,实现了波长为1030 nm的高效连续激光输出,斜率效率达到66%,输出功率大于3 W。

本文将非水基流延成型法制备的Yb:YAG平

面波导陶瓷作为激光增益介质,在940 nm波长的激光二极管阵列(LDA)抽运下实现了波长为1030 nm、功率为1.41 kW的连续激光放大输出,基于抽运源的输出功率,光-光转换效率达到31.1%,斜率效率为41%,高于已报道的Yb:YAG陶瓷平面波导的最高功率激光输出。

2 实验装置

平面波导具有特殊的复合结构,必须借助特定的技术进行制备。流延成型技术是一种精度高、厚度可控、可连续化生产的成型工艺,可广泛应用于单层或多层复合结构陶瓷的制备^[16-19]。将流延成型结合真空烧结工艺制备的YAG/Yb:YAG/YAG平面波导激光陶瓷作为增益介质。陶瓷平面波导结构如图1所示,平面波导结构的尺寸为1 mm×10 mm×60 mm,它是由两个厚度均为0.45 mm的YAG包层和尺寸为0.1 mm×10 mm×50 mm、掺杂浓度(原子数分数,下同)为10%的Yb:YAG的芯层组成。芯层两端各键合5 mm长的非掺杂YAG以减少端面抽运带来的热效应。波导端面镀有1030 nm和940 nm高透膜,波导大面镀SiO₂倏逝膜。

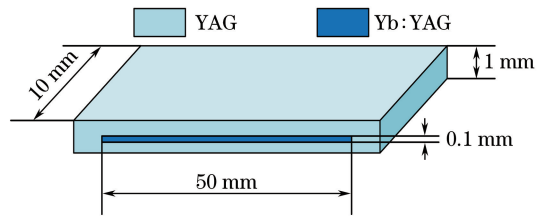


图1 平面波导结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of planar waveguide

1030 nm激光放大器的实验装置如图2所示,它由光纤种子源、隔离器、Yb:YAG平面波导增益介质、抽运源及耦合系统组成。种子源为1030 nm保偏光纤激光器,种子光经焦距分别为360 mm和220 mm的f1和f2两个球透镜缩束后进入隔离器,防止回光进入光纤激光器,光路中的45°反射镜M1和M2镀有1030 nm高反膜,在种子光的x方向使用曲率半径R_x=135 mm的柱透镜f3进行会聚后耦合进平面波导的端面。为防止未吸收而透过波导的部分抽运光通过耦合系统进入激光二极管阵列,激光放大器采用激光二极管阵列双端非对称抽运Yb:YAG平面波导的方式,波导大面与铜微通道热沉之间采用焊接方式,确保冷却水有效地传导波导产生的热,冷却水温为31℃。抽运源为2列×10 bar空

间叠加的半导体激光器阵列,抽运光在慢轴和快轴上的光斑尺寸为 $10\text{ mm} \times 19\text{ mm}$,它在慢轴和快轴的发散角分别为 4° 和 0.2° 。抽运耦合系统由 3 个曲率半

径分别为 $R_{y1} = 30\text{ mm}$ 、 $R_{y2} = 35\text{ mm}$ 和 $R_x = 35\text{ mm}$ 的柱透镜组成,抽运光经慢轴缩束和快轴会聚后以一定的角度从波导端面耦合进增益介质内部。

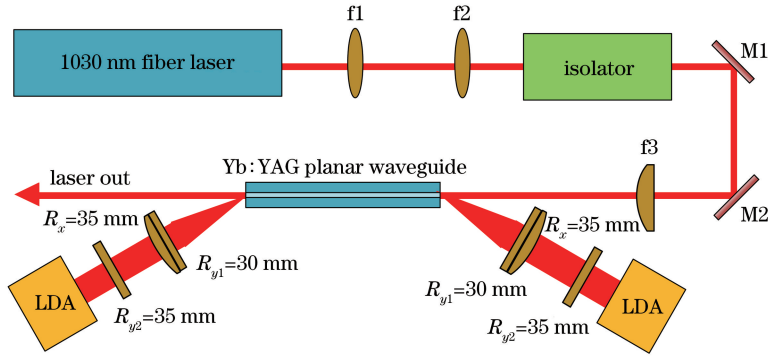


图 2 1030 nm 激光放大器光学示意图

Fig. 2 Schematic of 1030 nm laser amplifier

3 实验结果及分析

本实验分别测试了单端抽运及双端抽运对激光放大器效率的影响。光纤种子源输出功率为 136 W ,光束质量因子 $M^2 = 1.2$ 。在放大器不加载抽运时,种子光透过波导的功率为 52 W 。图 3(a)所示为单端抽运下的输出功率随抽运功率的变化曲线,可以看到,后端抽运的放大效率明显高于前端抽运。当前端抽运功率为 1805 W 时,输出功率为

512 W ,光-光转换效率为 20.6% ;当后端抽运功率为 1885 W 时,输出功率为 592 W ,光-光转换效率达到 24.2% 。图 3(b)所示为单端抽运下的光-光转换效率随抽运功率的变化曲线。从图 3(b)可以看到:当抽运功率小于 600 W 时,光-光转换效率的放大效果不明显,此时芯层吸收的抽运功率未达到反转所需的功率阈值;当抽运功率大于 600 W 时,光-光转换效率随抽运功率增大而增大,并且有继续增大的趋势。

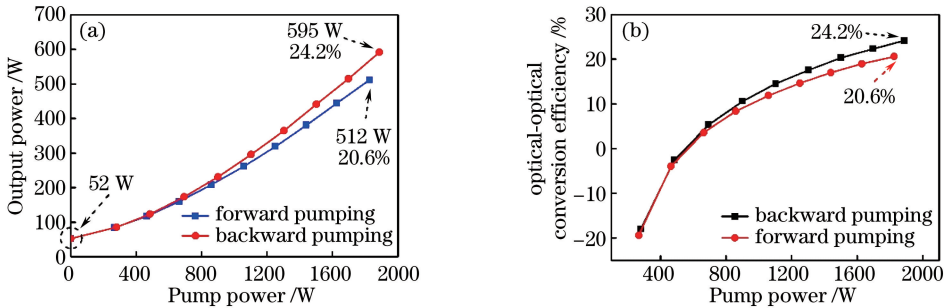


图 3 单端抽运结果。(a)输出功率随抽运功率的变化曲线;(b)光-光转换效率随抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Results under single-end pumping. (a) Output power versus pump power;

(b) optical-optical conversion efficiency versus pump power

对于三能级系统,为了克服光学损耗并达到激光阈值,芯层吸收功率密度需要达到一定的数值($\text{Yb} : \text{YAG}$ 达到反转所需的功率阈值为 1.7 kW/cm^3)^[20]。图 4 所示为单端抽运时芯层内不同位置处的抽运吸收功率密度曲线。可以看出,不管是前端抽运还是后端抽运,所有区域内的吸收功率密度已经远高于反转所需的功率阈值。但在单端抽运条件下,芯层长度方向上的吸收功率密度逐渐下降。为了增大芯层内所有区域的吸收抽运功率密度,获得

更高功率的激光输出,采用双端抽运方式进行放大测试。图 5 所示为双端抽运时芯层的吸收抽运功率密度,所有位置的吸收功率密度都远远高于反转功率阈值。对双端放大的输出特性进行测试,结果表明,在双端抽运最大功率为 4099 W 的条件下,输出功率为 1410 W ,光-光转换效率达到 31.1% ,斜率效率为 41% ,测试曲线如图 6 所示。可以看出,当抽运功率大于 2000 W 时,斜率效率具有良好的线性趋势,说明放大的自发辐射(ASE)的影响不明显。在此情况下,

如果继续增大抽运功率,将可以获得更高功率的激光输出,相应的光-光转换效率也会增大。

根据系统的各参数,利用 MATLAB 软件进行仿真计算,发现在相同的抽运功率下,放大器的光-光转换效率最高可达到 50%。由于材料内部损耗比较大,且产生一定的光束畸变,实验所得的转换效率与理论计算结果有一定差距,放大输出的激光光束质量并不理想,后续实验将进一步优化测试系统。此外,若采用损耗较低的波导材料,可能会实现更高功率和更高效率的激光输出。

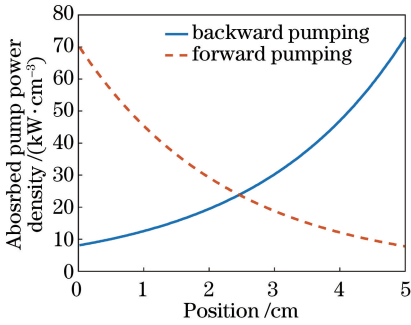


图 4 单端抽运时芯层内不同位置处的抽运吸收功率密度
Fig. 4 Absorbed pump power densities at different positions in gain zone under single-end pumping

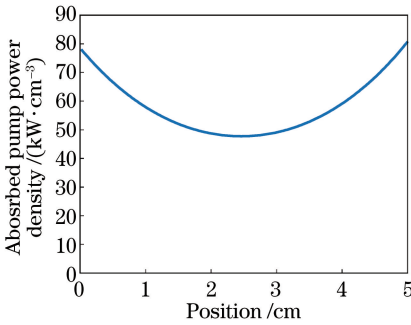


图 5 双端抽运时芯层内不同位置处的抽运吸收功率密度
Fig. 5 Absorbed pump power densities at different positions in gain zone under dual-end pumping

图 7 和图 8 为使用日本 YOKOGAWA 公司生产的 AQ6370C 型光谱分析仪测得的种子光和放大输出激光的光谱图。种子光的中心波长为 1030.09 nm, 3 dB 线宽为 0.14 nm; 在最大抽运功率下, 放大输出激光的中心波长为 1030.10 nm, 3 dB 线宽为 0.14 nm。放大输出激光的光谱特性与种子光基本一致, 说明放大过程对光谱宽度没有影响。

4 结 论

采用非水基流延成型结合真空烧结工艺制备出 YAG/Yb:YAG/YAG 平面波导激光陶瓷, 搭建双

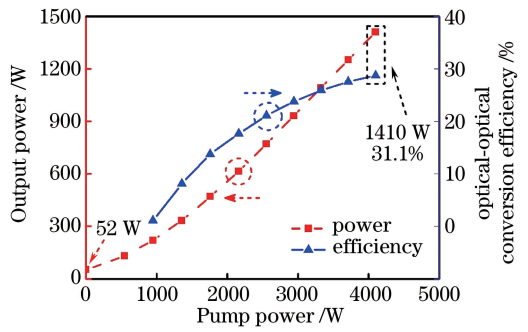


图 6 双端抽运下输出功率和光-光转换效率随抽运功率的变化曲线

Fig. 6 Output power and optical-optical conversion efficiency versus pump power under dual-end pumping

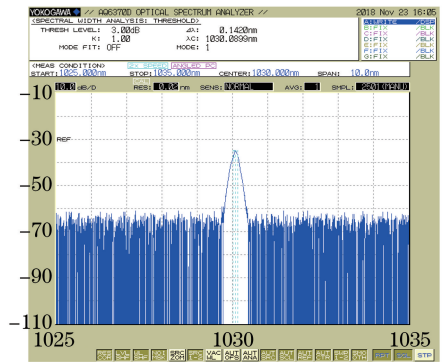


图 7 种子光的光谱图

Fig. 7 Spectrum of seed laser

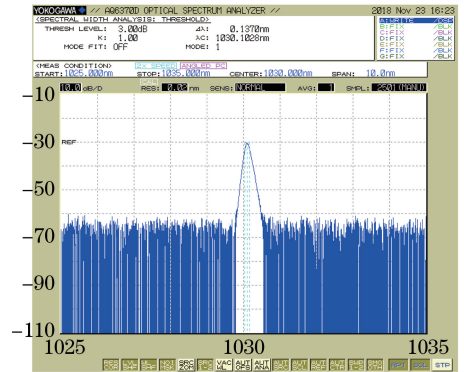


图 8 放大激光的光谱图

Fig. 8 Spectrum of amplified laser

端抽运陶瓷平面波导 Yb:YAG 激光放大器, 获得了功率为 1.41 kW 的激光输出, 光-光转换效率达到 31.1%。这是已报道的该类陶瓷平面波导达到的较高功率激光输出。结果表明, Yb:YAG 陶瓷平面波导在大功率二极管抽运固体激光器中具有良好的应用前景。

参 考 文 献

[1] Liu J, Wang J T, Zhou T J, *et al.* Analysis and

- developments of high-power planar waveguide lasers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27 (6): 79-85.
- 刘娇, 王君涛, 周唐建, 等. 高功率平面波导激光器研究进展及分析 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27 (6): 79-85.
- [2] Wang J T, Wang D, Su H, *et al.* Influence factors on efficiency of Nd:YAG planar waveguide laser amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (12): 1201005.
- 王君涛, 汪丹, 苏华, 等. Nd:YAG 平面波导激光放大器效率的影响因素 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1201005.
- [3] Wang J T, Wang X J, Zhou T J, *et al.* Design of end-pumped double cladding Nd:YAG planar waveguide laser amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0102009.
- 王君涛, 王小军, 周唐建, 等. 端面抽运双包层 Nd:YAG 平面波导激光放大器设计 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102009.
- [4] Filgas D, Rockwell D, Spariosu K. Next-generation lasers for advanced active EO systems [J]. Technology Today, 2008, 1: 9-13.
- [5] Filgas D, Clatterbuck T, Cashen M, *et al.* Recent results for the Raytheon RELI program [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8381: 83810W.
- [6] Thomson I J, Baker H J, Wlodarczyk K, *et al.* 400 W Yb:YAG planar waveguide laser using novel unstable resonators [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7578: 75780K.
- [7] Wang J T, Wu ZH, Su H, *et al.* 15 kW efficient CW Nd:YAG planar waveguide MOPA laser [J]. Optics Letters, 2017, 42(16): 3149-3152.
- [8] Chen Y J, Jiang H, Wang J T, *et al.* Planar waveguide oscillator with high output power and high efficiency [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (4): 0401001.
- 陈月健, 姜豪, 王君涛, 等. 高功率高效率平面波导激光振荡器实验研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0401001.
- [9] Gao Q S, Hu H, Pei Z P, *et al.* Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0202001.
- 高清松, 胡浩, 裴正平, 等. 10 kW 级固体板条激光放大器设计与实验研究 [J]. 中国激光, 2012, 39 (2): 0202001.
- [10] Li N, Pang Y, Lu Y H, *et al.* 800 mJ high beam quality all-solid-state 1319 nm pulsed laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(8): 0802007.
- 李楠, 庞毓, 鲁燕华, 等. 800 mJ 高光束质量全固态 1319 nm 脉冲激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802007.
- [11] Boulon G. Fifty years of advances in solid-state laser materials [J]. Optical Materials, 2012, 34(3): 499-512.
- [12] Ge L, Li J, Zhou Z W, *et al.* Fabrication of composite YAG/Nd:YAG/YAG transparent ceramics for planar waveguide laser [J]. Optical Materials Express, 2014, 4(5): 1042-1049.
- [13] Lin H F, Tang F, Chen W D, *et al.* Diode-pumped tape casting planar waveguide YAG/Nd:YAG/YAG ceramic laser [J]. Optics Express, 2015, 23(6): 8104-8112.
- [14] Liu J, Ge L, Feng L W, *et al.* Diode-pumped composite ceramic Nd:YAG planar waveguide amplifier with 327 mJ output at 100 Hz repetition rate [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(5): 051404.
- [15] Wang C, Li W X, Yang C, *et al.* Ceramic planar waveguide laser of non-aqueous tape casting fabricated YAG/Yb:YAG/YAG [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 31289.
- [16] Li J, Ge L, Zhou Z W, *et al.* Development of solid-state waveguide laser materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(1): 48-59.
- 李江, 葛琳, 周智为, 等. 全固态波导激光材料的研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(1): 48-59.
- [17] Tang F, Cao Y G, Huang J Q, *et al.* Multilayer YAG/Re:YAG/YAG laser ceramic prepared by tape casting and vacuum sintering method [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32(16): 3995-4002.
- [18] Yang K W, Ba X W, Li J, *et al.* Multilayer YAG/Yb:YAG composite ceramic laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21 (1): 168-172.
- [19] Li J, Jiang N, Ge L, *et al.* Research development and future prospect of optical waveguide laser ceramics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030001.
- 李江, 姜楠, 葛琳, 等. 光波导激光陶瓷的研究进展与展望 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030001.
- [20] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. Sun W, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 357-397.
- 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 孙文, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 357-397.