

Nd:YAG 平面波导 1319 nm 激光放大研究

林伟平^{1,2,3}, 张雷^{1,2}, 王君涛^{1,2*}, 陈月健^{1,2}, 徐浏^{1,2}, 汪丹^{1,2},
周唐建^{1,2}, 童立新^{1,2}, 鲁燕华^{1,2}, 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

摘要 报道了一种波长为 1319 nm 的准连续 Nd:YAG 平面波导激光放大器。种子源为基于侧面抽运棒状 Nd:YAG 激光头的振荡器, 放大器的激光增益介质为平面波导结构 Nd:YAG。YAG 平面波导的尺寸大小为 0.6 mm×10 mm×60 mm, 中心区域 0.1 mm×10 mm×50 mm 为掺杂区, 周围均为非掺杂 YAG。放大器的抽运源为半导体激光器阵列, 抽运光经过耦合后从后端面进入平面波导材料, 种子光从前端进入单通放大输出。Nd:YAG 平面波导与两个微通道热沉焊接起来实现良好的散热, 端面镀 1319、1064 和 808 nm 高透膜层。当抽运电流为 110 A、重复频率为 200 Hz 时, 获得了功率为 36 mJ 的 1319 nm 激光输出, 放大光效率为 8.3%。

关键词 激光器; 平面波导; Nd:YAG; 1319 nm

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.011404

Amplification Properties of 1319 nm Nd:YAG Planar Waveguide

Lin Weiping^{1,2,3}, Zhang Lei^{1,2}, Wang Juntao^{1,2*}, Chen Yuejian^{1,2},
Xu Liu^{1,2}, Wang Dan^{1,2}, Zhou Tangjian^{1,2}, Tong Lixin^{1,2}, Lu Yanhua^{1,2}, 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

Abstract A quasi continuous wave Nd:YAG planar waveguide laser amplifier with a wavelength of 1319 nm is reported. The seed source is an oscillator based on a side-pumped rod Nd:YAG laser model, and the gain medium of the amplifier is a planar waveguide Nd:YAG. The size of the YAG planar waveguide is 0.6 mm×10 mm×60 mm, the central area 0.1 mm×10 mm×50 mm is the doped region, and the surrounding area is undoped YAG. The pump source of the amplifier is a diode laser array, which is coupled from the rear end into the planar waveguide gain medium. The seed laser is coupled into the gain medium via the end facet, and a single-pass amplification is introduced. In order to achieve the good heat dissipation, two micro channel heat sinks are welded onto the Nd:YAG planar waveguide. The end facets are coated high transmission at 1319, 1064 and 808 nm. When the driving current of the diode laser arrays is 110 A and the pulse repetition rate is 200 Hz, the output of 36 mJ 1319 nm laser is obtained, and the optical to optical efficiency is 8.3%.

Key words lasers; planar waveguide; Nd:YAG; 1319 nm

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.4480

收稿日期: 2018-06-14; 修回日期: 2018-07-14; 录用日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61705209)

* E-mail: wjt_caep@126.com

1 引言

1319 nm 的全固态激光器由于光束质量好、结构紧凑和性能稳定等特点,在钠信标、激光显示、激光医学、光纤通讯和环境监测等方面具有非常重要的应用价值和前景^[1-4]。因此 1319 nm 激光一直是国内外的研究热点。

2005 年,Denman 等^[5]采用种子源注入环形腔锁定放大器获得了功率为 60 W、光束质量因子 M^2 为 1.1 的 1319 nm 连续激光输出,其中激光工作介质为棒状 Nd:YAG 结构。2010 年,Sawruk 等^[6]采用主振荡功率放大(MOPA)结构和种子源为尾纤 LD 端面抽运棒状 Nd:YAG 的环形腔结构获得平均功率为 13~15 W、重复频率为 77 MHz、脉宽为 200~500 ps 的 1319 nm 激光。放大器的每一级均为双通放大结构,经三级放大后平均功率为 85 W,光束质量接近衍射极限。2011 年,许祖彦等^[7]采用 MOPA 结构,获得了功率为 21.7 W、重复频率为 500 Hz 的 1319 nm 激光。在放大器中,采用一级双通加一级单通结构,激光输出功率为 59.6 W,放大光光效率为 6.6%。2013 年,李楠等^[8]采用基于 MOPA 结构的准连续长脉冲 1319 nm 激光器,放大器采用棒状 Nd:YAG 结构,输出单脉冲激光能量为 800 mJ。2013 年,Zheng 等^[9]采用矩形板条端面抽运方式,种子光利用反射镜多次通过板条宽度方向上的不同区域,实现了五通放大结构。种子源采用重复频率为 1 kHz、脉宽为 75 μ s、平均功率为 10 W 的 1319 nm 激光,经板条五通放大后输出功率为 42.3 W,放大光光效率为 6.5%。2016 年,谢仕永等^[10]采用 885 nm LD 双端抽运 Nd:YAG 三镜环形腔,产生了窄线宽准连续微秒脉冲 1319 nm 激光,平均功率为 22.5 W,其中激光介质为直径 3 mm 的 Nd:YAG 激光棒。

目前,已报道的 1319 nm 激光均是在棒状和板条 Nd:YAG 上实现的^[11-14]。传统棒状结构在高功率抽运下存在严重的热效应,不仅降低了光束质量、增大退偏损耗,还限制功率的进一步提高。板条结构的热效应相对于棒状结构有了较大的改善,但由于 1319 nm 的发射截面只有 1064 nm 的 1/3,板条放大器中的 1319 nm 激光效率仍较低。由于棒状和板条结构存在缺陷,为了获得更高性能的 1319 nm 激光输出,需要寻找新的激光增益介质结构,为此本文提出采用平面波导结构的 Nd:YAG 作为激光放大增益介质,获得了脉冲能量为 36 mJ 的准连续

1319 nm 激光输出,光光效率为 8.3%。

2 实验装置

平面波导增益介质构型介于板条和光纤之间^[15]。在厚度上为波导结构,其中芯层厚度一般为几十微米到几百微米,在长度上为常规尺寸。它结合了板条和光纤在构型上的优点而避免了缺点,使之具有激光效率高、抽运耦合易行以及高效散热等优点^[16]。通过建立平面波导结构的热应力模型,进行理论分析及计算,可知在一定波导厚度下,芯层越薄,可承受的热负载功率越大,因此,理论上芯层厚度越小越好。但考虑到实际工艺难度,实验采用的平面波导结构尺寸为 0.6 mm \times 10 mm \times 60 mm,芯层厚度控制在 100 μ m。如图 1 所示,芯层为掺杂原子数分数为 1.5% 的 Nd:YAG,包层为非掺杂 YAG,芯层两端各键合 5 mm 长的非掺杂 YAG。波导端面镀有 1319、1064 和 808 nm 高透膜,两个侧面镀 SiO₂ 倏逝膜。此外,为了抑制 1064 nm 的寄生振荡和放大的自发辐射(ASE),对波导端面进行切角处理。

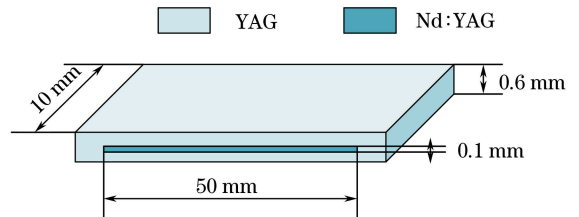


图 1 平面波导结构示意图

Fig. 1 Schematic of planar waveguide configuration

Nd:YAG 激光介质在室温条件下可同时跃迁产生 1064、1319 和 1338 nm 激光^[17],但由于 1319 nm 的发射截面只有 1064 nm 的 1/3,而且平面波导 Nd:YAG 放大器的增益非常高,容易产生 1064 nm 波长的寄生振荡和 ASE,因此难以产生单一 1319 nm 波长激光,需要抑制 1064 nm 和 1338 nm 波长激光起振。图 2 为 1319 nm 激光器光路示意图,其中谐振腔结构包括腔镜 M1、M2、分光镜 M3、两个 Nd:YAG 抽运头、1319 nm 旋光晶体和偏振片。全反镜 M1 镀 1319 nm 高反膜和 1338 nm 高透膜,输出镜 M2 镀 1319 nm 部分反射膜和 1064 nm 高透膜,分光镜 M3 镀 1064 nm 高反膜和 1319 nm 高透膜以增加 1064 nm 激光的损耗,从而有效抑制谐振腔内 1064 nm 和 1338 nm 激光的起振。

如图 2 所示,为防止放大器中的回光进入谐振腔,保持振荡器输出激光状态稳定,在输出镜 M2 后

加入由布儒斯特角薄膜偏振片、 $\lambda/2$ 波片和法拉第旋光器组合成的隔离器。由于种子光光束较小,为使种子光斑大小与平面波导尺寸相匹配,首先采用两个球透镜进行扩束,光路中的 45° 反射镜镀有

1319 nm高反膜。种子光经扩束之后,光斑直径约为10 mm, X 方向使用柱透镜进行会聚,使种子光有效耦合进平面波导端面。 X 方向对应增益介质的导波方向, Y 方向对应非导波方向。

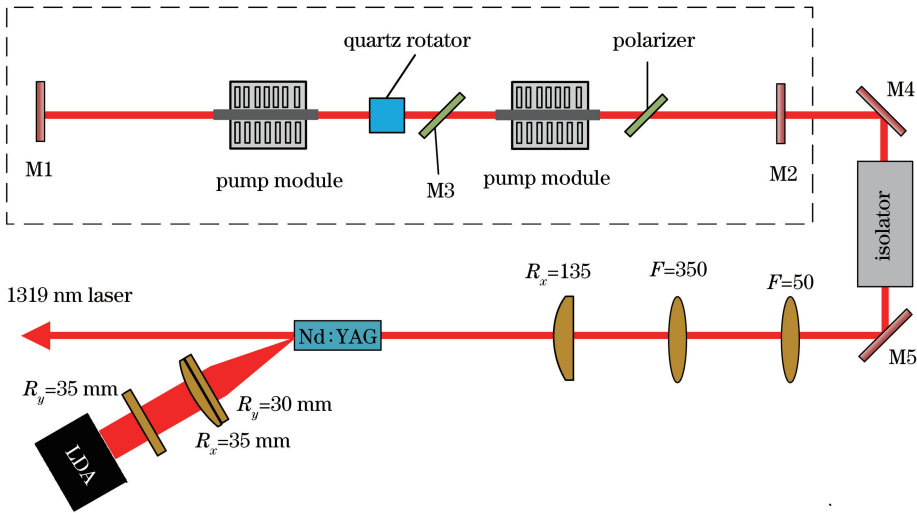


图2 1319 nm激光放大器光学示意图

Fig. 2 Optical sketch map of 1319 nm laser amplifier

放大器采用端面抽运耦合,抽运源为2列 \times 10 bar空间叠加的半导体激光器阵列(LDA),抽运光在 25°C 冷却水条件下工作。抽运光慢轴方向用 $R_y=35\text{ mm}$ 和 $R_y=30\text{ mm}$ 柱透镜缩束,快轴方向用 $R_x=35\text{ mm}$ 的柱透镜对光斑聚焦。抽运源的慢轴方向对应平面波导的非导波方向,抽运光由慢轴缩束和快轴会聚后以一定的倾斜角度从波导端面进入增益介质内部。进入波导内部的抽运光在YAG和 SiO_2 倏逝膜的界面上全内反射,多次经过芯层被吸收。将抽运光以不同角度耦合进波导,测试端面反射比例和抽运透射比例,用于选择合适的抽运耦合角度。由于端面膜层均需要对三个波长高透射率,所以无法实现在大角度范围内对808 nm均高透射率。在实验测试中,角度越大,端面对抽运光的反射比例越大。对于从端面进入平面波导内部的抽运光,当角度较小时,抽运光经过芯层的次数明显减小,芯层对抽运光的吸收不足。因此需要整体考虑,选择合适的抽运光工作角度,实现增益介质对抽运光的高效率吸收。

3 实验结果及分析

振荡级在重复频率为200 Hz时,输出脉宽为 $170\ \mu\text{s}$ 的1319 nm波长激光,光束质量因子为 $M_x^2=1.12, M_y^2=1.17$ 。根据前期理论计算结果和实验结果^[18],在平面波导激光放大器中,后端抽运

放大的光光效率高前于前端抽运,因此实验中采用后端抽运方式。两个通水热沉焊接到Nd:YAG平面波导的大面,实现增益介质的良好散热,抽运源冷却水温度为 25°C 。为避免在种子光提取能量前,波导积累足够能量而产生寄生振荡,需要调整抽运信号的脉宽及信号延时,使放大器抽运激光脉冲与种子光脉冲完全同步。放大器无加载时,波导后的1319 nm激光平均功率为2.7 W。当抽运工作电流为110 A,抽运功率为54 W时,输出功率为7.22 W,放大光光效率为8.3%。输出功率曲线和光光效率曲线如图3所示,可以看出,放大器输出功率基本随抽运功率线性增加,放大器工作稳定。

根据系统各参数,理论计算相应抽运功率下的

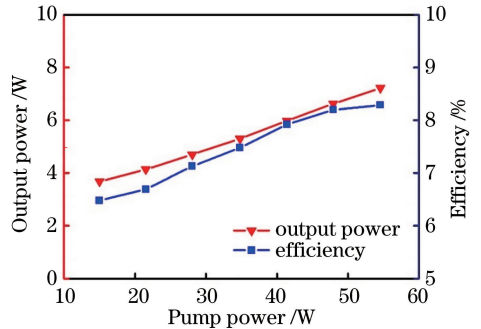


图3 输出功率和光光效率随抽运工作电流变化曲线图

Fig. 3 Change curve of output power and luminous efficiency versus pump working current

输出平均功率和光光效率,如图4所示。当抽运功率为54 W时,理论输出功率可以达到10.5 W,光光效率为15%。在理论计算过程中,未考虑 ASE 的影响。对比两组曲线可知,实验测试数据均低于理论计算值。光光效率较低的原因主要在于波导存在较强的 ASE 以及较大的材料自身损耗。材料中存在较强的储能,但这部分储能以 ASE 的形式传递出去。若能采用损耗较小的材料,则放大光光效率可以得到一定程度的提升。

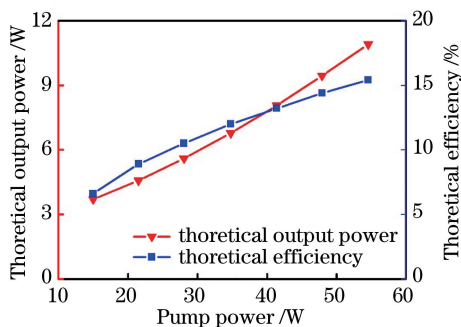


图4 理论计算的功率和效率随着抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Theoretical output power and efficiency versus pump power

采用光谱分析仪(AQ6370C, YOKOGAWA 公司,日本)测量输出激光的光谱,设置扫描测量范围为1317~1321 nm。当抽运功率为54 W时,光谱如图5所示,中心波长为1319.23 nm,20 dB线宽为0.04 nm,放大输出的光谱特性与种子光一致。

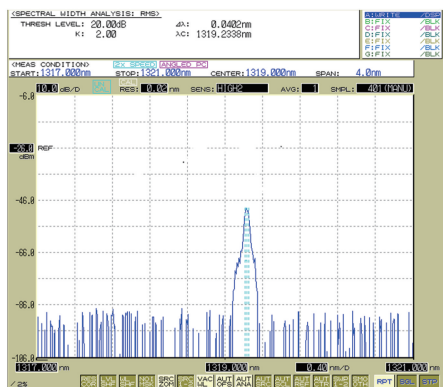


图5 输出激光光谱

Fig. 5 Output laser spectrum

4 结 论

采用平面波导 Nd:YAG 作为激光放大器增益介质,实现了 Nd:YAG 平面波导激光放大器 1319 nm 准连续激光输出。当抽运电流为 110 A、重复频率为 200 Hz 时,获得了、脉冲宽度为 170 μ s,脉

冲能量为 36 mJ 的 1319 nm 激光输出,放大光光效率为 8.3%。验证了平面波导结构实现 1319 nm 激光放大的可行性。下一步将优化激光放大系统,重点减小系统 ASE,实现更效率的 1319 nm 激光输出。

参 考 文 献

- [1] Lu J H, Lu J R, Murai T, *et al.* 36-W diode-pumped continuous-wave 1319-nm Nd:YAG ceramic laser[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1120-1122.
- [2] Wang Y F, Han K Z, Wang Y, *et al.* High power CW and Q-switched operation of a diode-side-pumped Nd:YAG 1319-nm laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(2):124-126.
- [3] Chen H X, Yang Z F, Wang J R, *et al.* A comparative study on ocular damage induced by 1319 nm laser radiation[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2011, 43(4): 306-312.
- [4] Wang T, Yao J Q, Yu D Y, *et al.* Study on CW Nd:YAG laser 1319 nm and 660 nm [J]. *Journal of Tianjin University*, 2004, 37(5): 377-381.
王涛,姚建铨,郁道银,等. 1319 nm 与 660 nm 双波长 Nd:YAG 激光器的研究[J]. *天津大学学报*, 2004, 37(5): 377-381.
- [5] Denman C A, Hillman P D, Moore G T, *et al.* Realization of a 50-watt facility-class sodium guidestar pump laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5707: 46-50.
- [6] Sawruk N, Lee I, Jalali M, *et al.* System overview of 30 W and 55 W sodium guide star laser systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7736: 77361Y.
- [7] Xu Z Y, Xie S Y, Bo Y, *et al.* Investigation of 30 W-class second-generation sodium beacon laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900111.
许祖彦,谢仕永,薄勇,等. 30 W 级第二代钠信标激光器研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900111.
- [8] 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.
- [9] Zheng J K, Bo Y, Xie S Y, *et al.* High power quasi-continuous-wave diode-end-pumped Nd:YAG slab amplifier at 1319 nm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(7): 074202.
- [10] Xie S Y, Zhang X F, Le X Y, *et al.* A quasi-continuous dual-end 885 nm diode-pumped three-

- mirror ring-cavity laser operating at 1319 nm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(15): 154205.
- 谢仕永, 张小富, 乐小云, 等. 885 nm 双端泵准连续微秒脉冲 1319 nm 三镜环形腔激光 [J]. *物理学报*, 2016, 65(15): 154205.
- [11] Hou W, Lin X C, Li J M. 1.2 kW high power 1319 nm all-solid state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3328.
- 侯玮, 林学春, 李晋闽. 1.2 kW 高功率 1319 nm 波长全固态激光器 [J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3328.
- [12] Bian Q, Zhong Q S, Chang J Q, *et al.* High-power narrow-linewidth QCW diode-pumped TEM₀₀ 1319 nm Nd:YAG oscillator using twisted-mode technique [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(6): 065001.
- [13] Lu Y H, Zhang L, Liu D, *et al.* 7.13 W All-solid-state 1319 nm macro-micro pulse laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1604-1606.
- 鲁燕华, 张雷, 刘东, 等. 7.13 W 全固态 1319 nm 宏微脉冲激光器 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(11): 1604-1606.
- [14] Chen R, Zhai G, Jin F, *et al.* Study on pulsed electro-optic Q-switched Nd : YAG laser at 1319 nm [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 603-606.
- 陈仁, 翟刚, 金锋, 等. 1319 nm Nd:YAG 脉冲电光调 Q 激光器的研究 [J]. *激光技术*, 2010, 34(5): 603-606.
- [15] Chen S L, Liu Q, Meng J Q, *et al.* Research progress in planar waveguide lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050004.
- 陈思露, 刘琪, 孟俊清, 等. 平面波导激光器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050004.
- [16] 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.
- [17] Koechner W. *Solid-state laser engineering* [M]. Sun W, Jiang Z W, Cheng G X. Transl. Beijing: Science Press, 2002.
- 克希耐尔. *固体激光工程* [M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [18] 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.