

800 mJ 高光束质量全固态 1319 nm 脉冲激光器

李楠^{1,2,3} 庞毓^{1,2*} 鲁燕华^{1,2} 张雷^{1,2} 谢刚^{1,2} 王卫民^{1,2} 许晓小^{1,2}

¹ 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
² 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900
³ 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 报道了一台高能量、高光束质量激光二极管抽运全固态 1319 nm 激光器, 激光器采用了主振荡器与放大器 (MOPA) 结构。通过反射镜镀膜和插入 45° 反射镜增加损耗以抑制 1338 nm 和 1064 nm 激光起振。主振荡器腔内插入温控法布里-珀罗 (F-P) 标准具实现线宽压窄和波长选择。为充分提取放大器能量以获得高能量脉冲输出, 两级激光放大器均为双程放大, 并对激光驱动电源信号进行处理, 使激光器主放大器注入激光脉冲与驱动电源脉冲在时域上的重合性更好。在主放大器抽运电流为 140 A 时获得了脉冲能量为 800 mJ 的 1319 nm 激光输出, 光束质量因子 $M^2 = 1.49$, 线宽为 1.05 GHz, 重复频率为 50 Hz, 脉宽约为 200 μs 。

关键词 激光器; 全固态激光器; 高能量激光; 1319 nm 激光; 光束质量

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0802007

800 mJ High Beam Quality All-Solid-State 1319 nm Pulsed Laser

Li Nan^{1,2,3} Pang Yu^{1,2} Lu Yanhua^{1,2} Zhang Lei^{1,2} Xie Gang^{1,2}

Wang Weimin^{1,2} Xu Xiaoxiao^{1,2}

¹ The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
² Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
³ Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract A high energy and high beam quality laser diode pumped all-solid-state laser is reported. Master oscillator and power amplifier construction is used. The 1338 nm and 1064 nm oscillations are suppressed by coating reflector and inserting 45° mirror to increase losses. A temperature-controlled Fabry-Porro etalon is inserted in resonant cavity to realizing linewidth narrowing and wavelength selecting. In order to achieve high output energy, the laser is amplified twice in pre-amplifier and main amplifier. Drive source signal is delayed to make injected laser pulse of main amplifier and drive source pulse time-synchronization better. When pumping current of the main amplifier is 140 A, the laser output energy is 800 mJ, the beam quality factor M^2 is 1.49, and the linewidth is 1.05 GHz. The repetition frequency is 50 Hz with the pulse width of about 200 μs .

Key words lasers; all-solid-state laser; high energy laser; 1319 nm laser; beam quality

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.3538

1 引 言

高能量 1319 nm 脉冲激光在医学和自适应光学等方面有重要应用。Nd:YAG 激光器介质在室温条件下可同时跃迁产生 1064、1319、1338 nm 激光

振荡^[1], 但是由于 1319 nm 发射截面相对较窄, 要得到高能量的 1319 nm 单一波长激光输出比较困难。实现较好光束质量和高能量的 1319 nm 激光输出一直是国内外研究热点。

收稿日期: 2013-03-01; 收到修改稿日期: 2013-04-11

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60890201)和中国工程物理研究院科学技术发展基金项目(2012A0401020)

作者简介: 李楠(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: linan87@sohu.com

导师简介: 王卫民(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: weimin_653@163.com

* 通信联系人。E-mail: chenxl3175@sohu.com

2000年,日本 Inoue 等^[2]实现功率为 122 W,光束质量因子 M^2 为 35 的 1319 nm 连续激光输出。2005年,美国空军研究实验室 Denman 等^[3]采用注入锁定激光器获得功率为 60 W,光束质量因子 M^2 为 1.1 的 1319 nm 连续激光输出。2006年,日本国家天文台 Saito 等^[4]获得功率为 4.99 W, M^2 为 1.1 的 1319 nm 激光输出。2009年,中国科学院理化技术研究所谢仕永等^[5]通过主振荡器与放大器(MOPA)结构的激光器获得平均功率为 25 W,重复频率为 500 Hz,光束质量因子 M^2 为 1.4 的 1319 nm 脉冲激光输出。同年,中国科学院半导体研究所侯玮等^[6]报道了一台输出功率为 1.2 kW 的 1319 nm 激光器,但是没有提到除功率外的其他相关参数。在最近两年报道的 589 nm 激光器中,均用到高功率、高光束质量 1319 nm 激光器作为基频光源^[7-9]。

目前国内外研究机构所获得的高功率 1319 nm

激光大部分是连续波输出,有关高能量、长脉冲、高光束质量的二极管抽运全固态 1319 nm 激光器报道较少^[10-16]。本文报道的 1319 nm 激光器采用 MOPA 结构,在主放大器工作电流为 140 A 时,获得了 800 mJ 脉冲能量输出,光束质量因子 M^2 为 1.49,线宽为 1.05 GHz,重复频率为 50 Hz,脉宽约为 200 μ s。

2 激光器设计

以 Nd:YAG 棒作为增益介质的单级谐振腔激光器难以获得高能量、高光束质量的激光输出,在高抽运能量下,严重的热效应会引起光束质量的快速退化。要在高能量激光输出时获得较好的光束质量,可采用 MOPA 结构的激光器,将高光束质量的种子激光进行放大。激光器为主振荡器与两级放大器结构,如图 1 所示。

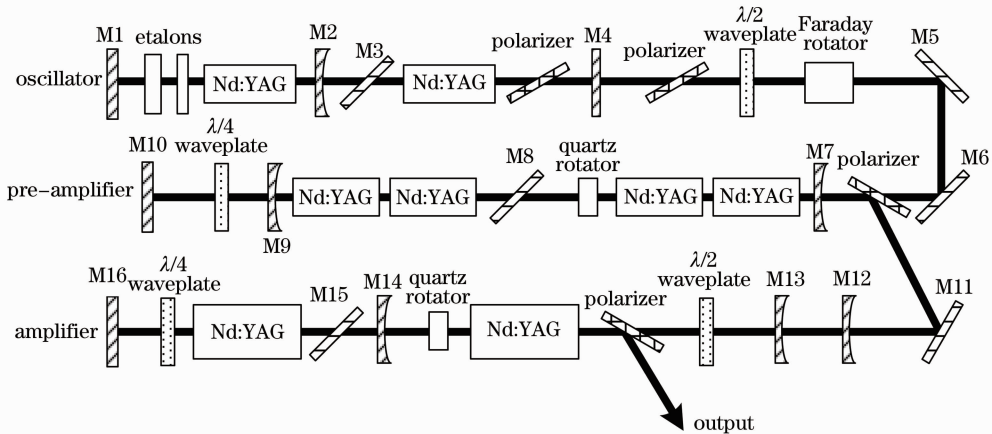


图 1 激光器装置示意图

Fig. 1 Sketch map of laser

2.1 振荡器

Nd:YAG 介质中 1319 nm 激光发射截面较窄,因此在激光器设计时,需要采取措施以抑制发射截面更宽的 1064 nm 和 1338 nm 波长激光起振:振荡器为双棒串接平-平对称腔结构,全反镜 M1 镀 1319 nm 高反膜与 1338 nm 高透膜,未针对 1064 nm 波长激光镀膜;输出镜 M4 镀有 1319 nm 部分反射膜与 1064 nm 高透膜。在实验过程中发现,仅靠输出镜镀膜增加 1064 nm 波长损耗不能有效抑制其起振,激光器工作时检测到有 1064 nm 激光。因此,在腔内插入镀有 1064 nm 高反膜与 1319 nm 高透膜的 45° 反射镜以增加 1064 nm 激光损耗,实验中经观察无 1064 nm 激光起振。由于 M1 镜对 1338 nm 的激光透射率不高,腔内有部分 1338 nm 激光起振,对此考虑利用标准具在压窄

1319 nm 激光线宽的同时,增加 1338 nm 损耗,消除其振荡。为控制线宽,在全反镜前插入一组法布里-珀罗(F-P)标准具,并对其采取精确到 0.1 °C 的温控措施。根据抽运模块在工作电流下的热焦距选取负透镜 M2 对两棒工作时的热透镜进行补偿,增大基模体积,从而获得较好的光束质量。输出镜前插入偏振片,使激光线偏振输出。

振荡器输出激光经 M5 与 M6 两个 45° 反射镜(镀 1319 nm 全反膜)注入预放大器。M5 镜前的偏振片、 $\lambda/2$ 波片和法拉第旋转器组合成隔离器防止预放大器回光进入振荡器。

2.2 预放大器

为充分提取能量,预放大器设计使用双程放大体制。预放大器使用增益介质为直径 3 mm 的 Nd:YAG 棒。通过该抽运模块搭建谐振腔测量输出

能量对激光储能进行估算,在 50 Hz 重复频率下电流为 95 A 时得到波长为 1064 nm 的脉冲能量为 250 mJ,按提取效率 80%求得波长为 1064 nm 的储能约为 313 mJ,估算 1319 nm 激光储能为 100 mJ。根据公式 $g_0 = E_{st}/(E_s V)$ (其中 g_0 为小信号增益系数, E_{st} 为增益介质储能,单位为 mJ, E_s 为介质饱和通量,单位为 mJ/cm^2 , V 为介质体积,单位为 cm^3),求得 1064 nm 激光的小信号增益系数为 2.37 cm^{-1} , 1319 nm 激光为 0.79 cm^{-1} ,进而获得双程放大增益,则此时易出现 1064 nm 自激振荡。因此抽运电流应小于 95 A,经实验测定电流为 88 A 时无 1064 nm 自激振荡并满足放大要求。

预放大器采用四棒串接结构,其中两个抽运模块为一组。透镜 M7 将振荡器输出激光注入激光扩束器,使之与预放大器模块 Nd:YAG 棒口径相匹配。两组模块间插入 45° 平面镜 M8 (镀 1319 nm 高透膜与 1064 nm 高反膜) 避免预放大器内产生 1064 nm 寄生振荡。将补偿热致双折射与热致退偏的 90° 石英旋转器置于 M8 之后,能有效防止与全反镜间产生自激。为了对晶体棒的热透镜进行补偿,全反镜 M10 前插入透镜 M9。激光两次通过全反镜前的 $\lambda/4$ 波片后由 p 偏振态旋转为 s 偏振态,在二次放大后通过 M7 前的偏振片输出。

2.3 主放大器

为了在获得较高的 1319 nm 激光放大增益的同时,避免 1064 nm 自激振荡,对主放大器使用的棒尺寸与抽运模块工作电流进行了模拟计算。在获得预放大器输出激光参数后,经计算可知注入光能量密度与饱和能量密度相比较小,因此在计算时认为是小信号增益。根据对不同尺寸介质棒在不同工作电流下 1319 nm 与 1064 nm 激光小信号增益系数的计算,获得了两个波长激光的双程放大增益系数。在使用直径为 4 mm 的介质棒,工作电流小于 150 A 时,放大器不易出现自激振荡。

主放大器结构与预放大器类似。预放大器输出激光经透镜 M12 与 M13 扩束至与棒尺寸匹配,以使棒中储能被充分提取。扩束后的激光通过 $\lambda/2$ 波片旋转偏振态,经偏振片进入棒中。主放大器采用两个抽运模块串接,为避免棒端面回光放大,对棒端进行了切角处理,光轴方向有一定倾斜。模块间插入 90° 石英旋转器,补偿负透镜 M14 和 45° 反射镜 M15 镀 1319 nm 高透膜与 1064 nm 高反膜。1319 nm 全反镜 M16 前插入 $\lambda/4$ 波片改变光偏振态。激光经双程放大后,由偏振片输出。

3 实验结果与分析

根据设计的 1319 nm 脉冲激光器,振荡器输出功率为 1.5 W,脉冲能量为 30 mJ,光束质量为 $M_x^2 = 1.22, M_y^2 = 1.25$ 。经预放大器后输出功率为 9.5 W,脉冲能量为 190 mJ,放大增益倍数为 6.33。激光输出功率随主放大器工作电流的变化,如图 2 所示。

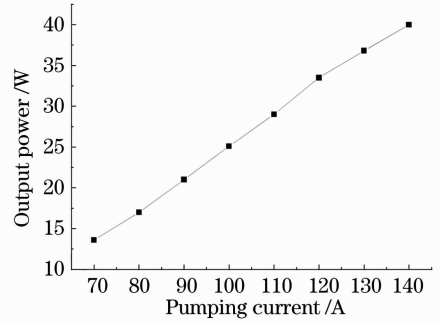


图 2 1319 nm 激光输出功率随工作电流的变化

Fig. 2 Output power of 1319 nm laser versus pumping current

图 2 中,在抽运电流逐渐增大的情况下,输出功率线性增加,说明放大器在该电流范围中工作在稳定状态。当主放大器抽运电流为 140 A 时,获得最大平均功率为 40 W 的 1319 nm 脉冲激光输出,单脉冲能量为 800 mJ,放大增益倍数为 4.21。由于在激光器每一级中均加入 45° 反射镜以抑制 1064 nm 激光振荡,造成部分 1319 nm 激光在振荡和两级双程放大过程中逸出。若能提高全反镜镀膜质量,无需对 1064 nm 的 45° 全反镜就能抑制 1064 nm 振荡,输出激光能量还可有一定程度的提高。

由于设计的激光器在各级放大中均进行了热透镜效应补偿,因此获得了较好的光束质量。光束质量测量仪器为 Spiricon 公司生产的 M-200 型 M^2 因子测量仪。在激光器输出能量为 800 mJ 时,光束质量因子 $M^2 = 1.49$ ($M_x^2 = 1.44, M_y^2 = 1.54$),如图 3 所示。

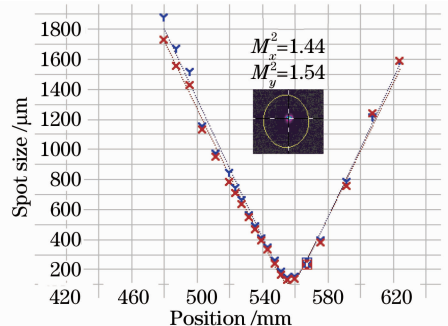


图 3 光束质量

Fig. 3 Beam quality

对于输出激光谱线的测量采用日本 YOKOGAWA 公司 AQ6370C 型光谱分析仪,设置扫描测量范围为 1000~1350 nm。由图 4 可知,所获得

的激光光谱为单一谱线,中心波长为 1319.155 nm, 1064 nm 和 1338 nm 激光被充分抑制。

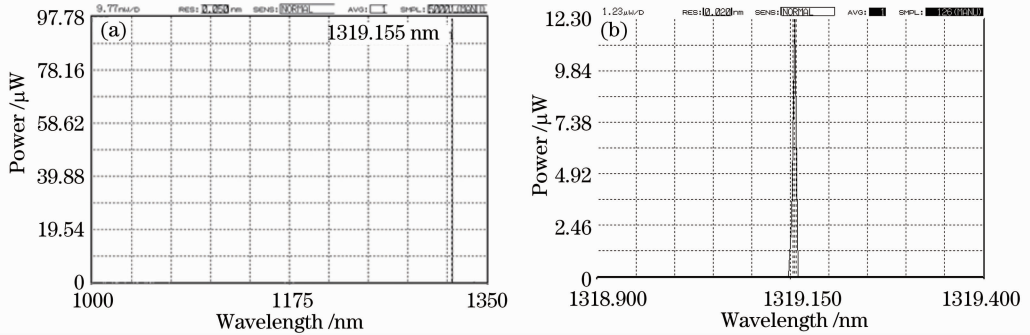


图 4 输出激光光谱

Fig. 4 Output laser spectra

图 5 为输出激光脉冲波形。激光器的振荡器、预放大器和主放大器均采用同一信号源驱动,重复频率为 50 Hz,脉宽为 250 μs,如图 5(a)所示。激光脉宽约为 200 μs,这是由于在信号驱动过程中,为了获得最大的输出功率,通过信号延迟对激光器不同级间选取了合适的抽运时间匹配,以使两级放大器注入激光脉

冲与驱动电源脉冲在时域上具有更好的重合性。脉冲前沿有较强的尖峰,并随时间动态变化,这是由于长脉冲激光器在运转时存在的弛豫振荡。在振荡器输出激光脉冲波形中,前沿尖峰较强,但是脉冲后部较为匀滑,经两级放大后,弛豫振荡峰分布逐渐延伸至脉冲后部,如图 5(b)所示。

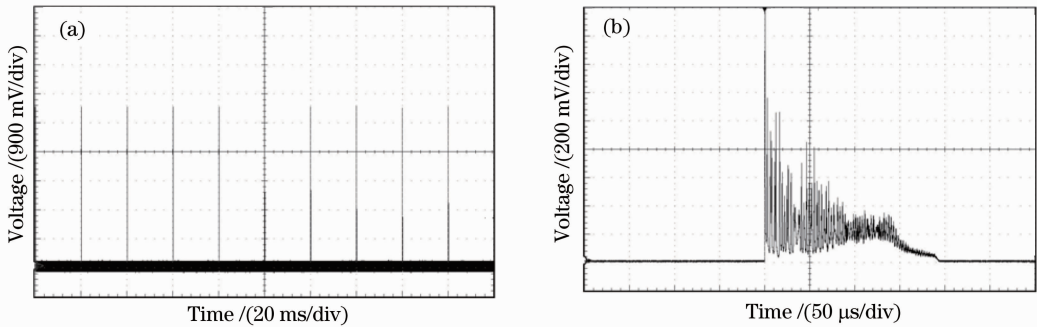


图 5 1319 nm 激光脉冲波形。(a) 重复频率;(b) 单脉冲

Fig. 5 1319 nm laser pulse. (a) Repetition frequency; (b) single pulse

使用 WS-7 型高分辨率波长计测量激光线宽,由于波长计的有效测量范围在 1100 nm 以下,因此不能直接测量 1319 nm 激光参数。对此,采用间接测量方法:将 1319 nm 激光倍频为 660 nm 激光后再进行测量。根据倍频前后的频率关系,可知 1319 nm 激光的线宽是 660 nm 激光线宽的一半。测得倍频后的 660 nm 激光线宽为 2.1 GHz,则 1319 nm 激光线宽为 1.05 GHz。

质量 1319 nm 单一波长激光输出。验证了 MOPA 结构用于发展大能量、高光束质量 1319 nm 激光器是可行的。下一步工作将对弛豫振荡的抑制及在高光束质量下输出功率的提高进行研究,以获得更佳脉冲波形和脉冲能量的 1319 nm 激光输出。

4 结 论

设计了一台全固态 1319 nm 脉冲激光器,采用 MOPA 结构,获得了重复频率为 50 Hz,脉宽为 200 μs,单脉冲能量为 800 mJ, $M^2 = 1.49$ 的高光束

参 考 文 献

- 1 W Koehner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang. Transl. Beijing: Science Press, 2002. W 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.
- 2 Yoko Inoue, Shuichi Fujikawa. Diode-pumped Nd:YAG laser producing 122 W CW power at 1.319 μm[J]. IEEE J Quant Electr, 2000, 36(6): 751-756.
- 3 Craig A Denman, Paul D Hillman, Gerald T Moore, et al.. Realization of a 50-watt facility-class sodium guidestar pump laser [C]. SPIE, 2005, 5707: 46-49.

- 4 Yoshihiko Saito, Yutaka Hayano, Norihito Saito, *et al.*. 589 nm sum-frequency generation laser for the LGS/AO of Subaru Telescope[C]. SPIE, 2006, 6272; 627246.
- 5 Xie Shiyong, Lu Yuanfu, Ma Qinglei, *et al.*. High power high beam quality diode-pumped 1319-nm Nd:YAG oscillator-amplifier laser system[J]. Chin Phys B, 2010, 19(6): 064208.
- 6 Hou Wei, Lin Xuechun, Li Jinmin. 1.2 kW high power 1319 nm all-solid-state laser[J]. Chinese J 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.
- 7 Lu Yanhua, Zhang Lei, Liu Shengxi, *et al.*. 15.5 W all-solid-state extra-cavity sum-frequency generation 589 nm yellow laser [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2419-2423.
鲁燕华, 张 雷, 刘晟西, 等. 15.5 W 全固态腔外和频 589 nm 黄光激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2419-2423.
- 8 Xu Zuyan, Xie Shiyong, Bo Yong, *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.
- 9 Lu Yanhua, Xie Gang, Pang Yu, *et al.*. 340 mJ all-solid-state sodium beacon laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0708004.
鲁燕华, 谢 刚, 庞 毓, 等. 340 mJ 全固态钠信标激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0708004.
- 10 Lu Junhua, Lu Jianren, Tomoyo Murai, *et al.*. 36-W diode-pumped continuous-wave 1319 nm Nd:YAG ceramic laser[J]. Opt Lett, 2002, 27(13): 1120-1122.
- 11 Wang Tao, Yao Jianquan, Li Xifu, *et al.*. Study on CW Nd:YAG laser at 1319 nm[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(10): 881-884.
王 涛, 姚建铨, 李喜福, 等. 波长为 1319 nm 的连续输出 Nd:YAG 激光器的研究[J]. 中国激光, 2003, 30(10): 881-884.
- 12 Lian Weiyan, Zhou Yu, Wang Tingying, *et al.*. Study of 1319 nm Nd:YAG laser and its frequency doubling[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(6): 508-512.
廉伟艳, 周 瑜, 王廷营, 等. 1319 nm Nd:YAG 激光器的研制及其倍频研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(6): 508-512.
- 13 Wang Jianjun, Yang Tao, Jiang Dongsheng, *et al.*. 192 W 1319 nm Nd:YAG laser[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(8): 717-718.
王建军, 杨 涛, 姜东升, 等. 192 W 的 1319 nm Nd:YAG 激光器[J]. 激光与红外, 2007, 37(8): 717-718.
- 14 Chen Ren, Zhai Gang, Jin Feng, *et al.*. Study on pulsed electro-optic Q-switched Nd:YAG laser at 1319 nm laser [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 Y F Lü, X H Zhang, J Xia, *et al.*. All solid-state continuous-wave Nd:YAG laser at 1319 and 659.5 nm under direct 885 nm pumping[J]. Laser Physics, 2010, 20(1): 200-204.
- 16 Ramunas Bakanas, Julius Pileckas. Frequency doubled pulsed single longitudinal mode Nd:YAG laser at 1319 nm with pulse buildup negative feedback controls [C]. SPIE, 2010, 7578: 75780V.

栏目编辑:张 腾