

# 二极管抽运全固态 1.319 $\mu\text{m}$ 连续锁模激光器

鲁燕华<sup>1</sup> 张雷<sup>1</sup> 马毅<sup>1</sup> 武德勇<sup>1</sup> 魏彬<sup>1</sup> 刘洋<sup>2</sup> 王智林<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)  
(<sup>2</sup>中国电子科技集团第二十六研究所, 重庆 400060)

**摘要** 报道了一台全固态、高亮度、亚纳秒级的 1.319  $\mu\text{m}$  连续主动锁模激光器。谐振腔采用四镜折叠热稳腔, 以二极管抽运的两个 Nd:YAG 模块作为增益模块, 并利用主动幅度调制的声光锁模器进行锁模。锁模运转后激光器稳定输出平均功率为 9.6 W, 光束质量因子  $M^2 < 2$ 。锁模激光脉冲重复频率为 100 MHz, 脉宽约 630 ps。

**关键词** 激光器; 全固态; 主动锁模; 二极管抽运; 折叠腔; 1.319  $\mu\text{m}$

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100306

## Diode Pumped All-Solid-State 1.319 $\mu\text{m}$ Continuous Mode-Locked Laser

Lu Yanhua<sup>1</sup> Zhang Lei<sup>1</sup> Ma Yi<sup>1</sup> Wu Deyong<sup>1</sup> Wei Bin<sup>1</sup> Liu Yang<sup>2</sup> Wang Zhilin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900, China)  
(<sup>2</sup>26th Research Institute, China Electricity Technology Company, Chongqing 400060, China)

**Abstract** An all-solid-state, high-brightness and sub-nanosecond 1.319  $\mu\text{m}$  continuous active mode-locked laser was reported. The oscillator was adopted folded thermal stabilized cavity with four mirrors. The gain modules were two Nd:YAG modules pumped by diodes. The laser was mode-locked by an active amplitude-modulated acousto-optic mode-locker (AOM). An average output power of up to 9.6 W with an excellent stability and beam quality with a  $M^2$ -value lower than 2 was obtained when the laser was mode-locked. The repetition rate was 100 MHz and the pulse width was about 630 ps.

**Key words** lasers; all-solid-state; active mode-locked; diode pumped; folded cavity; 1.319  $\mu\text{m}$

**OCIS codes** 140.0140; 140.3480; 140.3530; 140.3580; 140.4050

## 1 引 言

1.319  $\mu\text{m}$  激光位于普通熔石英光纤的零色散波长附近, 因此该波段的锁模激光器在大容量、高效率、长距离无中继的光纤通信领域具有重要应用价值<sup>[1,2]</sup>。此外, 1.319  $\mu\text{m}$  连续锁模激光器还可作为和频钠导星激光器的基频光源, 美国、日本等发达国家已将该波段锁模激光器应用于天文观测与目标成像方面<sup>[3,4]</sup>。

对 Nd:YAG 而言, 人们用各种锁模方法(包括主动式、被动式、主被动结合式)实现了高功率高光束质量的 1.064  $\mu\text{m}$  连续锁模激光器运转, 但对 1.319  $\mu\text{m}$  波长的锁模技术没有深入研究。由于 1.319  $\mu\text{m}$  附近没有合适的吸收染料, 故难以实现染料吸收被动锁模<sup>[1]</sup>。采用主动锁模技术是实现

1.319  $\mu\text{m}$  激光锁模的有效途径, 其方法是将一个驱动频率与纵模频率间隔相匹配的调制器插入激光腔内, 使激光器产生重频刚好为激光器纵模间隔的锁模脉冲波列<sup>[5,6]</sup>。与被动锁模技术相比, 主动锁模技术利用外部调制信号来驱动控制锁模激光器的频率, 工作方式简单可靠, 但由于其调制率通常不足以在很大的带宽范围内维持锁相, 因此所获得的脉冲要比连续被动锁模激光器的长<sup>[6]</sup>。

由于 Nd:YAG 晶体中 1.319  $\mu\text{m}$  发射谱线较弱(其受激发射截面仅约为 1.064  $\mu\text{m}$  的 1/3), 再加上主动锁模谐振腔长度通常较长(1 m 以上), 损耗较大, 并且稳定的锁模运转还存在自身的阈值、光束质量要求<sup>[7]</sup>, 因此, 虽然人们在连续和调 Q 体制 1.319  $\mu\text{m}$  激光器上取得了较大突破<sup>[8,9]</sup>, 但关于

收稿日期: 2010-08-25; 收到修改稿日期: 2010-11-08

作者简介: 鲁燕华(1981—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: happyeleo@yahoo.com.cn

1.319  $\mu\text{m}$  锁模激光器的研究极少。从报道的文献来看,国内仅获得了 0.5 W 的 1.319  $\mu\text{m}$  连续锁模激光输出<sup>[10]</sup>。

本文利用自行封装的大功率侧面抽运 Nd:YAG 激光模块和国产 1.319  $\mu\text{m}$  声光锁模器,并优化设计具有大基模体积分布的四镜折叠腔,获得了平均功率 9.6 W,光束质量因子  $M^2 < 2$  的 1.319  $\mu\text{m}$  连续锁模激光输出,锁模脉冲重复频率为 100 MHz,脉宽约 630 ps。

## 2 实验装置

激光器装置示意图如图 1 所示。谐振腔采用四镜折叠腔,增益模块为二极管抽运的双棒串接 Nd:

YAG 晶体,晶体掺杂原子数分数为 0.6%,尺寸为  $\Phi 4 \text{ mm} \times 106 \text{ mm}$ 。两模块结构完全相同,每个模块采用 5 边 4 圈共计 20 个二极管激光器抽运 [图 1(a)],并在两模块之间插入  $90^\circ$  石英旋转片补偿热致双折射和热致退偏。图 1(b) 中 M1 为平面全反镜,放置在一个平移台上来调节激光器腔长,折叠镜 M2 与 M3 为凹面全反镜,M4 为平面耦合输出镜。1.319  $\mu\text{m}$  声光锁模器(AOM)采用拉曼-奈斯衍射,声光晶体为布儒斯特角切割的石英晶体,驱动频率可在 49.000~50.999 MHz 范围内以 1 kHz 精度调节。将 AOM 尽可能靠近输出镜 M4 放置,可使纵模之间达到最佳的耦合效果。

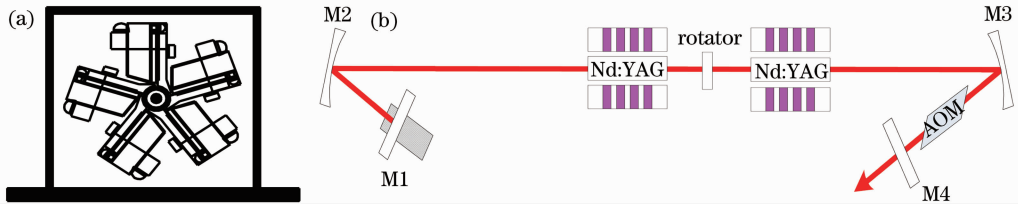


图 1 (a) 激光增益模块及 (b) 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of (a) laser gain module and (b) experimental setup

Nd:YAG 的荧光发射谱具有多个发射峰,常温下以 1.064  $\mu\text{m}$  最为突出,其次是 1.319  $\mu\text{m}$  和 0.946  $\mu\text{m}$ 。对于 Nd:YAG 的 1.064  $\mu\text{m}$  谱线和 1.319  $\mu\text{m}$  谱线,它们具有相同的激光上能级( $^4F_{3/2}$ )和不同的激光下能级( $^4F_{11/2}$ ,  $^4F_{13/2}$ )。由于能级斯塔克分裂,在 1.319  $\mu\text{m}$  处同时存在 1.319  $\mu\text{m}$  ( $R_2 \rightarrow X_1$ ), 1.338  $\mu\text{m}$  ( $R_2 \rightarrow X_3$ ) 和 1.356  $\mu\text{m}$  ( $R_1 \rightarrow X_4$ ) 等多条谱线<sup>[11]</sup>。因此,要实现 1.319  $\mu\text{m}$  激光运转,必须抑制 Nd:YAG 晶体的其他谱线激光(尤其是 1.064  $\mu\text{m}$  和 1.338  $\mu\text{m}$ )。在激光器设计过程中,分别在全反镜 M1 和输出镜 M4 中镀制双色膜,即可实现获得 1.319  $\mu\text{m}$  单一谱线输出之目的。

为了与声光锁模器的调制频率  $f_m$  匹配,激光器等效腔长  $L$  (定义为从全反镜 M1 到输出镜 M4 所经历的光程) 应精确满足:

$$L = c/4f_m,$$

式中  $c$  为光速;  $f_m$  为声光锁模器调制频率。

当调制频率为 50 MHz 时,激光器等效腔长为 1.500 m,考虑到两个 Nd:YAG 晶体长度、 $90^\circ$  石英旋转器厚度以及 AOM 内石英晶体厚度,激光器几何腔长应设计为 1.315 m。将锁模激光器设计成折叠腔,除了可以缩短激光器的长度外,还可以避免平面全反镜 M1 与输出镜 M4 之间形成标准具效应,并且折叠腔可对抽运模块的热透镜进行补偿,获得大基模体积激光输出。图 2 是针对本激光器结构并考虑两个抽运模块热透镜效应情况下,模拟的谐振腔内基模激光分布结果,纵坐标表示基模激光光斑尺寸,横坐标表示两光学元件之间的间距。

由图 2 可知,在抽运模块激光晶体棒内基模直径大于 2 mm (晶体棒直径为 4 mm), 较容易获得高

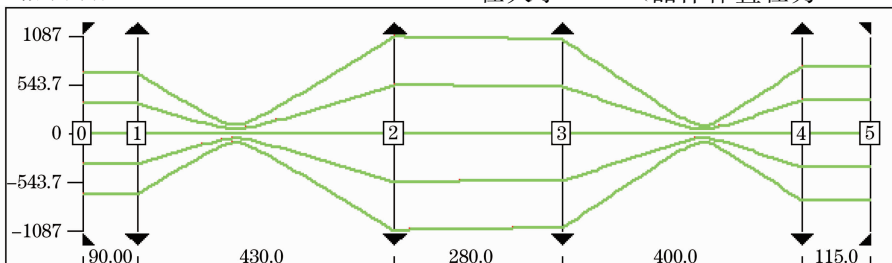


图 2 基模分布模拟结果

Fig. 2 Simulation of  $\text{TEM}_{00}$  mode distribution

光束质量的激光输出。在谐振腔内,基模分布存在两个类似聚焦点的极小位置,实验过程中应避免在此两处放置易被损伤的光学元件。

### 3 实验结果与分析

由于图 1 所设计的激光器装置只能在一定的热透镜范围内为稳定腔,在某一热焦距组合下光束质量才最佳,因此首先按设计光路搭建好激光器,使激光器连续工作,确定热稳工作电流动态范围。经实验判断,若图 1 中两激光增益模块工作电流相等,则激光器热稳工作电流范围为 28~35 A。调节两激光增益模块工作电流,当二者分别为 33 A 和 32 A 时连续输出功率最高,达 11.2 W,此时二极管发射 808 nm 总功率约为 400 W。

开启 AOM 驱动电源,微调驱动电源调制频率使锁模器衍射最强,并调节锁模器倾斜角度使衍射分布尽可能对称。保持两激光增益模块工作电流(33 A 和 32 A)不变,此时由于腔长失谐量较大,输出激光会呈现调 Q 锁模状态<sup>[12]</sup>,如图 3 所示。再通过平面全反镜 M1 的位移台精调锁模激光器的腔长,当激光器等效腔长严格满足(1)式的关系时,即可获得稳定的连续锁模运转,此时激光功率为 9.6 W,光-光效率约 2.4%,其时域波形如图 4 所示。

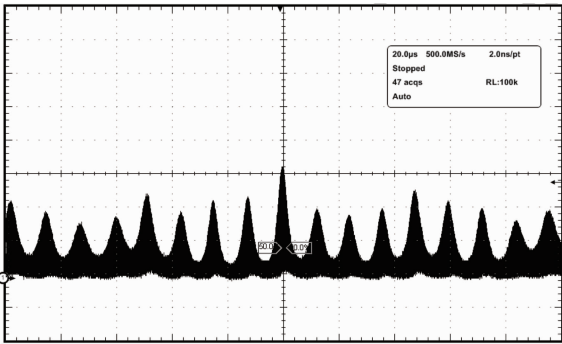


图 3 腔长失谐时调 Q 锁模波形

Fig. 3 Q-switched mode-locked pulse shape while detuning of cavity length

图 4 是用高速光电探测器(带宽 7.5 GHz)和美国 Tektronix 公司的示波器(带宽 3.5 GHz)监测得到连续锁模激光脉冲波形。其中图 4(a)是横坐标每格为 500  $\mu\text{s}$  时所观测到的结果,对比图 3、图 4 可以发现调 Q 锁模现象消失,激光脉冲呈现稳定、等幅的连续锁模状态。图 4(b)是横坐标每格为 10 ns 时的测量结果,由图可知,锁模微脉冲间隔刚好约 10 ns,对应重复频率约 100 MHz,脉宽约为 630 ps。

锁模激光器通常对锁模频率与腔长的失谐反应

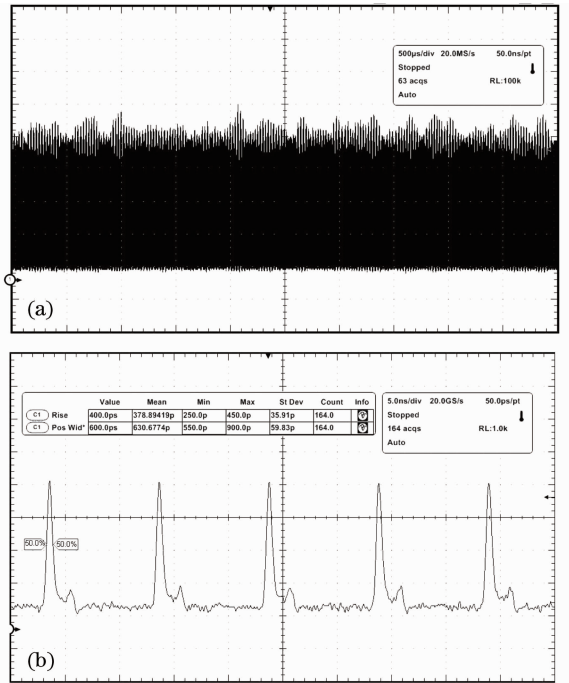


图 4 连续锁模激光脉冲波形。(a)宏观结果, (b)微观结果

Fig. 4 Pulse shape of continuous mode-locked laser. (a) macro result, (b) micro result

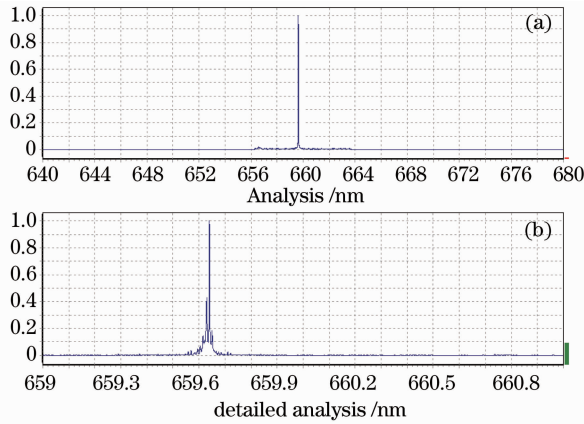
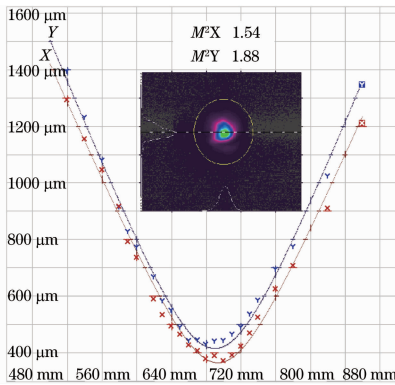
十分敏感,从而引起锁模状态不稳定、脉冲波形畸变等一系列问题,因此激光器大多数需采取腔长反馈控制措施。但在激光器中,锁模脉宽为 630 ps(考虑测量系统带宽限制,实际脉宽应约为 500 ps),根据 Markus Lührmann<sup>[13]</sup>的分析结果,激光器无需采用主动控制亦可维持稳定的锁模运转,实验结果也验证了这一结论。在实验室内隔时段 5 次启动激光器,每次运行 2 h 考核,激光器均能保持稳定的锁模状态。

由于实验室拥有的波长计测量范围为 0.4~1.1  $\mu\text{m}$ ,无法直接测量 1.319  $\mu\text{m}$  激光,采取的办法是先对 1.319  $\mu\text{m}$  激光进行倍频转换,测量出倍频光的谱线,然后推算出输出激光的中心波长。图 5 即为测量得到的倍频光谱线。

由图 5 可知,1.319  $\mu\text{m}$  激光倍频后中心波长约为 659.6 nm,且没有 532 nm 和 669 nm 谱线,表明激光器成功抑制掉 1.064  $\mu\text{m}$  和 1.338  $\mu\text{m}$ ,输出激光全部为 1.319  $\mu\text{m}$  激光。

同时,当输出 1.319  $\mu\text{m}$  连续锁模激光功率为 9.6 W 时,用 Spiricon 公司 M-200 测量其光束质量如图 6 所示。

Spiricon M-200 光束质量测量仪对 1.319  $\mu\text{m}$  的响应远低于 808 nm 和 1064 nm,因此在测量前须

图 5 1.319  $\mu\text{m}$  激光倍频后光谱Fig. 5 Spectrum of the second harmonic generation of 1.319  $\mu\text{m}$  laser图 6 1.319  $\mu\text{m}$  激光光束质量Fig. 6 Beam quality measurement of 1.319  $\mu\text{m}$  laser

充分滤掉 808 nm 散射抽运光和 1064 nm 自发辐射荧光。由图 6 测量结果所示,1.319  $\mu\text{m}$  激光在  $x$  方向与  $y$  方向的光束质量因子  $M^2$  均小于 2。

## 4 结 论

本文研制了一台二极管抽运的全固态 1.319  $\mu\text{m}$  主动锁模激光器,并通过激光器增益的优化设计、谐振腔数值模拟、腔长精密调节以及输出参数精确诊断等技术手段,获得了平均功率 9.6 W、重复频率 100 MHz、脉宽约 630 ps、光束质量因子  $M^2 < 2$  的 1.319  $\mu\text{m}$  连续锁模激光输出。该激光器除了亮度高、脉宽窄等特点,同时还具有免腔长反馈控制的自稳定功能。

## 参 考 文 献

- Zhang Zengming, Qi Kaiguo, Luo Shouyu *et al.*. 1320 nm Nd<sup>3+</sup>:YAG mode-locking pulsed laser [J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 1999, **16**(1): 47~49
- 张增明, 齐开国, 罗售余等. 波长 1320 nm 的 Nd<sup>3+</sup>:YAG 锁模脉冲激光器[J]. *量子电子学报*, 1999, **16**(1): 47~49
- S. J. Keen, G. T. Maker, A. I. Ferguson. Mode-locking of diode laser-pumped Nd:YAG laser at 1.3  $\mu\text{m}$ [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(8): 490~491
- Allen J. Tracy, Allen K. Hanla, Camilo Lopez *et al.*. High-power solid-state beacon laser guidestar for the Gemini North Observatory[C]. *SPIE*, 2004, **5490**: 998~1009
- Hideki Takami, Stephen Colley, Matt Dinkins *et al.*. Status of Subaru laser guide star AO system [C]. *SPIE*, 2006, **6272**, 62720C-1
- Li Xiangyin, Yao Minyu, Li Zhuo *et al.*. Principle Technology and Application of Laser [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007. 248~256
- 李相银, 姚敏玉, 李卓等. 激光原理技术与应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007. 248~256
- W. Koehler. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen Transl. Beijing: Science Press, 2002. 454~482
- W. 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 孙文译 北京: 科学出版社, 2002. 454~482
- Tan Min. Study of the building process of mode-locking laser pulse from the point of view of synergetics[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2000, **23**(4): 558~562
- 谭敏. 用协同学的观点研究锁模激光脉冲的建立过程[J]. *合肥工业大学学报*, 2000, **23**(4): 558~562
- Hou Wei, Lin Xuechun, Li Jinmin *et al.*. 1.2 kW high power 1319 nm all-solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3328
- 侯玮, 林学春, 李晋闽等. 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
- Wang Jianjun, Zou Yue, Zhao Shuyun *et al.*. Hecto-watt-level diode pumped solid-state red laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1560~1563
- 王建军, 邹跃, 赵书云等. 二极管抽运百瓦级红光固体激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1560~1563
- Chen Yuefeng, Zhang Shiwen. A 1.319  $\mu\text{m}$  CW Nd:YAG Mode-locking laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(4): 369~371
- 陈越峰, 张世文. 1.319  $\mu\text{m}$  连续固体锁模激光器[J]. *光学学报*, 1994, **14**(4): 369~371
- Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. High power laser diode pumped Nd:YAG continuous wave dual-wavelength laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 577~581
- 张强, 姚建铨, 温伍麒等. 高功率激光二极管抽运 Nd:YAG 连续双波长激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 577~581
- H. J. Eichler, I. G. Koltchanov, B. Liu. Numerical study of the spiking instability caused by modulation frequency detuning in an actively mode-locked solid-state laser[J]. *Appl. Phys. B*, 1995, **61**(1): 81~88
- Markus Lührmann, Christian Theobald, Richard Wallenstein *et al.*. Efficient generation of mode-locked pulses in Nd:YVO<sub>4</sub> with a pulse duration adjustable between 34ps and 1ns [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6177~6186