

连续和被动锁模 Nd:CGA 激光器的实验研究

何坤娜^{1,2} 刘家兴² 徐晓东³ 王兆华² 李德华² 田文龙² 徐军⁴ 狄聚青⁵ 夏长泰⁵ 魏志义^{2*}

¹ 中国农业大学理学院, 北京 100083

² 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190

³ 江苏师范大学物理与电子工程学院先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116

⁴ 同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092

⁵ 中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

摘要 采用 X 型谐振腔, 实验研究了二极管抽运 Nd:CGA 激光器的连续和被动锁模激光特性。当 Nd:CGA 激光器实现连续运转时, 采用不同透过率的输出镜优化激光器的连续输出功率。采用透射率为 20% 的输出镜时, 获得了 1.8 W 的最高连续输出功率, 斜率效率达到 30.8%, 中心波长为 1079 nm; 采用半导体可饱和吸收反射镜作为锁模元件、透射率为 1.6% 的平面镜作为输出镜, 获得了脉冲宽度为 2.7 ps、重复频率为 177 MHz 的被动锁模脉冲输出。当抽运功率为 6.9 W 时, 获得锁模脉冲的最大平均输出功率为 524 mW, 相应的光光转换效率和斜率效率分别为 7.6% 和 8.0%。

关键词 激光器; 二极管抽运; Nd:CGA 激光器; 连续激光; 被动锁模激光

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.101410

Continuous-Wave Passively Mode-Locked Nd:CGA Lasers

He Kunna^{1,2} Liu Jiaying² Xu Xiaodong³ Wang Zhaohua² Li Dehua² Tian Wenlong²
Xu Jun⁴ Di Juqing⁵ Xia Changtai⁵ Wei Zhiyi²

¹ College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China

² Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

³ Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

⁴ School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

⁵ Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The continuous wave (CW) and passive mode-locking features of a diode-pumped Nd:CGA laser are experimentally demonstrated with a typical X-type cavity. Under the CW operation, different output couplers (OCs) were used to optimize the CW output power of the Nd:CGA laser. With the OC of 20% transmission, the maximum CW output power of 1.8 W is achieved and the slope efficiency is 30.8% at the central wavelength of 1079 nm. By employing a semiconductor saturable absorber mirror for passive mode-locking, pulses as short as 2.7 ps with 177 MHz repetition rate are achieved for OC with transmission of 1.6%. The maximum average output power of 524 mW is obtained under a pump power of 6.9 W. The optical-to-optical conversion efficiency and the slope efficiency are 7.6% and 8.0%, respectively.

Key words lasers; diode-pumping; Nd:CGA laser; continuous-wave laser; passively mode-locked laser

OCIS codes 140.3480; 140.4050

收稿日期: 2016-06-27; **收到修改稿日期:** 2016-07-04; **网络出版日期:** 2016-09-21

基金项目: 国家 973 计划(2013CB922402)、国家自然科学基金国际联合研究项目(61210017)

作者简介: 何坤娜(1976—), 女, 博士, 讲师, 主要从事新型激光器件与技术等方面的研究。E-mail: hekunna@cau.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: zywei@aphy.iphy.ac.cn

1 引言

众所周知, $1\ \mu\text{m}$ 波长附近超短脉冲在光谱、光纤通信和医疗等方面具有重要应用, 探寻性能优良的 $1\ \mu\text{m}$ 波长附近超短脉冲激光材料一直是人们追求的目标。最近, Nd^{3+} 掺杂无序晶体由于普遍具有较宽的荧光谱和较好的热特性而备受关注^[1-3], 这类晶体的宽荧光谱有利于产生超短脉冲, 热特性好有助于稳定振荡器输出。目前, 基于 Nd^{3+} 掺杂无序晶体产生超短脉冲的报道已有很多^[4-8], 产生的超短脉冲主要为皮秒和飞秒量级。

无序基质 CaGdAlO_4 (CGA) 有许多优点, 例如低介电常数^[9] 和高机械强度(摩氏硬度为 6)^[10]。在过去的 20 年时间里, CGA 除被用作超导薄膜的基质材料, 还被掺杂多种稀土离子或跃迁金属离子后用作激光增益材料^[10-13], $\text{Nd}:\text{CGA}$ 就是其中一种。 $\text{Nd}:\text{CGA}$ 拥有宽的荧光谱, 其荧光谱的发射峰值在 1080 nm 附近, 谱线宽度与晶体浓度有关, 2% (原子分数) Nd^{3+} 掺杂 $\text{Nd}:\text{CGA}$ 晶体的谱线宽度为 8 nm^[10], 1% Nd^{3+} 掺杂的晶体谱宽约为 12 nm^[14]。另外, 其吸收峰位于 806.5 nm 附近, 吸收谱线宽度为 3.3 nm^[10]。由其吸收谱不难看出, $\text{Nd}:\text{CGA}$ 晶体是一种非常适合二极管激光抽运的激光晶体, 但到目前为止, 有关 $\text{Nd}:\text{CGA}$ 晶体的相关报道很少。1997 年, Lagatskii 等^[10] 对 2% Nd^{3+} 掺杂的 $\text{Nd}:\text{CGA}$ 晶体的光谱和连续(CW)激光特性进行了研究。最近, 本课题组采用 2 W 激光器作为抽运源, 实现了 1079 nm $\text{Nd}:\text{CGA}$ 激光器的被动锁模运转^[14]。 Nd^{3+} 掺杂无序激光材料实现四能级激光运转输出 $1\ \mu\text{m}$ 波长附近的激光时, 输出激光波长主要为 $1.06\ \mu\text{m}$ 左右。 $1079\ \text{nm}$ 相对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光波长较长, 且可用于抽运 He 原子^[14], 但上述锁模实验获得的最大输出功率、斜率效率和光光转换效率都非常低, 最大锁模输出功率为 93 mW, 对应的光光转换效率和斜率效率分别为 4.8% 和 5.3%。本文在以往工作的基础上, 利用具有更大输出功率的抽运源, 重新优化设计了谐振腔, 对 $1079\ \text{nm}$ $\text{Nd}:\text{CGA}$ 晶体的连续和锁模特性进行了更深入的实验研究。连续输出时功率最大可达 1.8 W, 可调谐范围达到 8 nm。当激光器实现锁模运转时, 获得了 524 mW 的最大连续锁模输出功率, 相应的光光转换效率和斜率效率分别提高到 7.6% 和 8.0%。

2 实验装置

设计了图1所示 X 型锁模谐振腔。抽运源是中心波长为 806 nm 的光纤耦合半导体激光器(LD), 光纤的芯径和数值孔径分别为 $100\ \mu\text{m}$ 和 0.22, 从抽运源输出的抽运光经过 1:1 耦合系统聚焦到激光晶体上。 $\text{Nd}:\text{CGA}$ 晶体沿 c 轴切割, 尺寸为 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$, Nd^{3+} 掺杂浓度为 1%。为了充分利用抽运光并确保 $1\ \mu\text{m}$ 波长附近激光的高效运转, $\text{Nd}:\text{CGA}$ 晶体的两通光面均镀有对 806 nm 和 $1\ \mu\text{m}$ 附近波长高透的介质膜, 且 $\text{Nd}:\text{CGA}$ 晶体被钢箔包裹并放置在铜质热沉中进行水冷, 冷却水的温度保持在 $11\ ^\circ\text{C}$ 。输入镜 M1 为平凹镜, M1 镀有对 806 nm 波长的增透膜以及对 $1\ \mu\text{m}$ 附近波长的高反膜。M2 和 M3 为折叠镜, M2 和 M3 均镀有对 $1\ \mu\text{m}$ 附近波长的高反膜。M1、M2 和 M3 的曲率半径分别为 75, 75, 100 mm。半导体可饱和吸收反射镜 (SESAM) 为被动锁模元件, 其对 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长的调制深度为 0.4%, 饱和能流密度为 $90\ \mu\text{J}/\text{cm}^2$, 恢复时间小于 500 fs。M4 为平面输出镜。在确保晶体和 SESAM 不被损坏的情况下, 锁模实验中晶体和 SESAM 上的功率密度越高, 越利于实现锁模^[15]。为此, 采用小透射率输出镜 (OC) 提高腔内脉冲能量, M4 对 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长的透射率为 1.6%。图 1 所示谐振腔总长约 0.85 m, 根据 ABCD 矩阵理论计算, $\text{Nd}:\text{CGA}$ 晶体和 SESAM 上振荡光的光斑半径分别为 $60\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 左右。

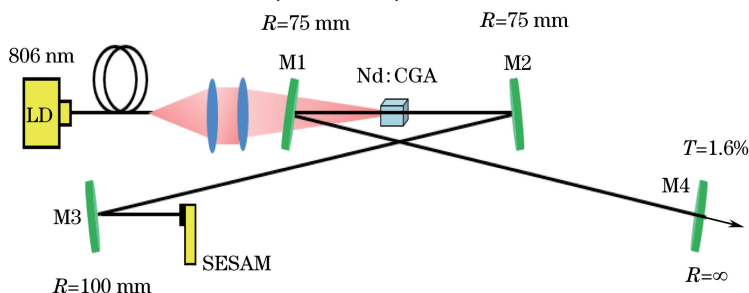


图 1 $\text{Nd}:\text{CGA}$ 锁模激光器的实验装置图

Fig. 1 Experimental layout of the mode-locked $\text{Nd}:\text{CGA}$ laser

3 实验结果

实验中首先研究激光器实现连续运转时的输出特性,用平面高反镜替换图 1 中的 SESAM,采用不同透射率的输出镜进行优化。图 2 是采用透射率分别为 1.6%、2.5%、10% 和 20% 的输出镜时,获得的连续平均输出功率与入射抽运功率的关系曲线。

由图 2 可知,随着输出镜透射率的增加,获得的最高平均输出功率和斜率效率均逐渐增加。采用透射率为 20% 的输出镜时,阈值抽运功率为 1.05 W,在抽运功率为 6.9 W 的情况下,获得的最高输出功率为 1.8 W,相应的光光转换效率和斜率效率分别为 26.1% 和 30.8%,输出激光中心波长为 1079 nm。另外,采用透射率为 1.6% 的输出镜时,在谐振腔内插入双折射滤光片,在 6.9 W 抽运功率下,实现了 1077.8~1085.9 nm 的连续调谐运转,连续调谐范围达到 8 nm,与文献[14]中用棱镜作调谐元件时获得的调谐范围相当。

采用图 1 实验装置,精心调整谐振腔,实现了 Nd:CGA 激光器的稳定被动连续锁模运转。图 3 为采用透射率为 1.6% 的输出镜时,Nd:CGA 被动锁模激光器的平均输出功率随入射抽运功率的变化。

如图 3 所示,当抽运功率小于 2.31 W 时,激光器输出连续光。当抽运功率增加到 2.31 W 时,连续锁模自启动(在 2.31 W 附近,并未观察到明显的调 Q 锁模迹象),后随着入射抽运功率的增加,锁模平均输出功率增大。当抽运功率为 6.9 W 时,获得了 524 mW 的最高平均输出功率,相应的光光转换效率和斜率效率分别是 7.6% 和 8.0%。实验中,激光器实现稳定连续锁模运转时,获得的最高平均输出功率、相应的光光转换效率和斜率效率均高于文献[14]中报道的相应参数。

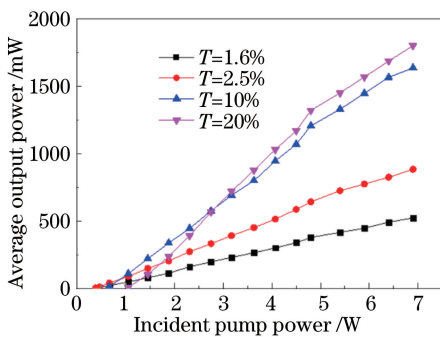


图 2 输出镜透射率不同时获得的平均输出功率随入射抽运功率的变化曲线

Fig. 2 Dependence of the average output power on the incident pump power for OCs with different transmittance

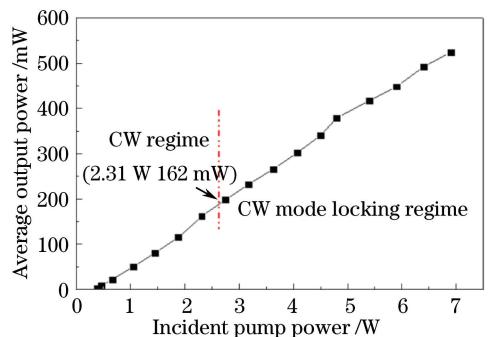


图 3 输出镜透射率 $T=1.6\%$ 时获得的平均输出功率随入射抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Dependence of the average output power on the incident pump power when an OC with $T=1.6\%$ is used

为了确认激光器运转于良好的连续锁模状态,利用示波器和频谱仪监测锁模信号。图 4(a)是激光器实现连续锁模运转时,利用示波器测量的两个不同时间尺度下的锁模脉冲序列。图 4(a)中上、下两幅图的时间尺度分别为 20 ns/div 和 1 ms/div。图 4(b)是频谱仪分辨率(RBW)设置为 1 kHz 时,在窄带宽范围内测得的基频锁模脉冲信号。由图 4(b)知,信号强度高达 60 dBm,脉冲重复频率为 177 MHz,对应 0.85 m 的腔长。图 4(b)插图是频谱仪分辨率为 100 kHz 时,在 1.5 GHz 带宽范围内的基频及其高次谐波信号。由图 4 不难看出,激光器实现被动连续锁模运转时锁模状态是非常稳定的。

图 5(a)是实验测得的锁模脉冲自相关信号,如图所示,假定锁模脉冲是双曲正割(sech^2)型,锁模脉冲的脉宽为 2.7 ps。图 5(b)是锁模脉冲的激光光谱。由图 5(b)可知,锁模脉冲的中心波长为 1079 nm,谱线宽度为 2 nm。根据上述脉宽和谱线宽度值,锁模脉冲的时间带宽积(1.39)较大,是理想时间带宽积(0.315)的 4.4 倍。这表明锁模脉冲存在严重的啁啾,这是由于输出镜透射率较小,振荡激光在腔内多次往返,造成较大的群速度色散。下一步实验中,希望能通过腔内加入色散补偿元件获得更短的脉冲宽度。另外,当抽运功率为 6.9 W,激光器运转于连续锁模状态时,利用 CCD (WinCamD-UCD15, DataRay 公司,德国)测量锁模激光的远场光斑空间分布情况,结果如图 5(c)所示,表明锁模脉冲激光的横向强度呈很好的高斯型分布。为

了进一步证实连续锁模状态下输出光束的质量,利用光束质量因子(M^2)分析仪,测量了输出激光脉冲的光束 M^2 值,子午方向和弧矢方向的 M^2 值分别为 1.31 和 1.39。

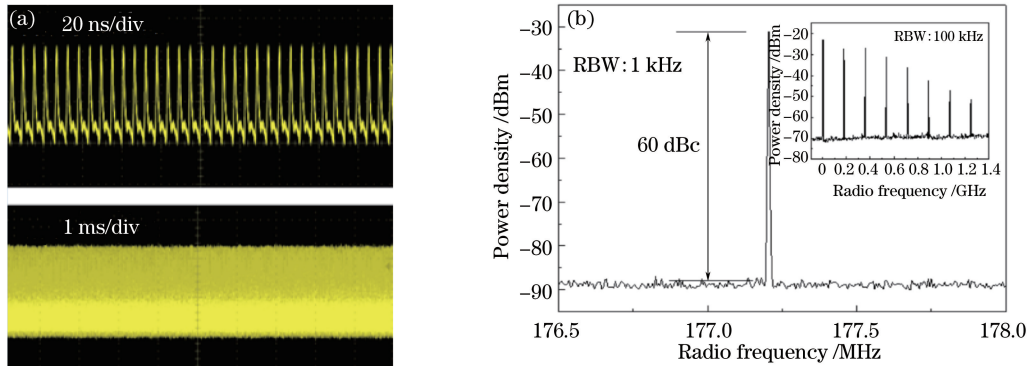


图 4 (a) 20 ns/div 和 1 ms/div 时间尺度下的连续锁模脉冲序列; (b) 频谱仪分辨率为 1 kHz 时连续锁模脉冲信号的基频频谱(插图: 频谱仪分辨率为 100 kHz 时 1.5 GHz 带宽范围内的频谱)

Fig. 4 (a) CW mode-locked pulse trains in 20 ns/div and 1 ms/div timescales;

(b) radio frequency (RF) spectrum of the CW mode-locked pulse train at the fundamental beat note with RBW of 1 kHz (inset: higher harmonics of the radio frequency spectrum on a 1.5 GHz wide span with RBW of 100 kHz)

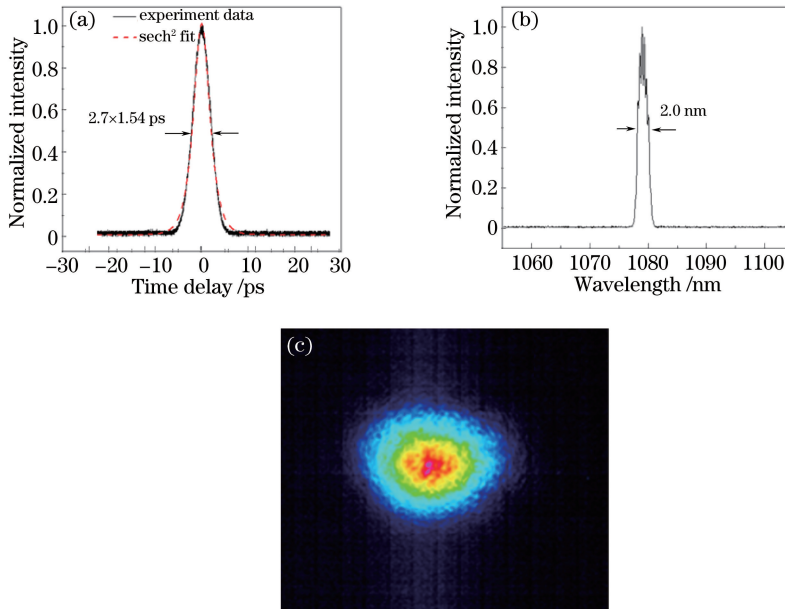


图 5 (a) Nd:CGA 锁模激光器的自相关曲线; (b) Nd:CGA 锁模激光器的输出激光光谱;

(c) 抽运功率为 6.9 W 时 Nd:CGA 锁模激光的强度空间分布

Fig. 5 (a) Autocorrelation trace of the mode-locked Nd:CGA laser; (b) spectrum of the mode-locked Nd:CGA laser; (c) spatial intensity profile of the mode-locked Nd:CGA laser under the pump power of 6.9 W

4 结 论

实验研究了二极管抽运 Nd:CGA 激光器的连续和被动锁模激光特性。当激光器工作在连续状态时,利用 $T=20\%$ 的输出镜,在抽运功率为 6.9 W 时,获得了 1.8 W 的最高输出功率;采用双折射滤光片作调谐元件,在 6.9 W 抽运功率下,实现了 Nd:CGA 激光器在 1077.8~1085.9 nm 的连续调谐运转,连续调谐范围约 8 nm。当激光器工作在连续锁模状态时,在 6.9 W 抽运功率下,获得的最大平均输出功率为 524 mW,相应的光光转换效率和斜率效率分别为 7.6% 和 8.0%。锁模运转时,获得的脉宽为 2.7 ps,脉冲重复频率为 177 MHz。在后续实验研究中,希望通过在谐振腔内引入色散补偿元件以获得更短的脉冲宽度。

参 考 文 献

- 1 Cheng Yan, Xin Zheng, Xu Xiaodong, *et al.* Growth and spectral properties of Nd:CaNb₂O₆ crystal [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1523-1527.
程 艳, 辛 征, 徐晓东, 等. Nd:CaNb₂O₆ 晶体的生长及光谱性质 [J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1523-1527.
- 2 Shi Yuxian, Lu Tielin, Feng Baohua, *et al.* Thermal effects analysis of Nd:CNGG 935 nm laser pumped by 885 nm and 808 nm diode lasers [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1102004.
施玉显, 卢铁林, 冯宝华, 等. 885 nm 和 808 nm LD 抽运 Nd:CNGG 935 nm 激光器热效应研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1102004.
- 3 Chen Lei, Zhao Shengzhi, Zheng Jiaan, *et al.* Laser characteristics of Nd³⁺:NaY(WO₄)₂ crystal pumped at 595 nm [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(6): 758-760.
陈 磊, 赵圣之, 郑加安, 等. 595 nm 激光抽运双钨酸钇钠晶体激光特性研究 [J]. 光学学报, 2002, 22(6): 758-760.
- 4 Luo H, Tang D Y, Xie G Q, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Nd:CLNGG laser [J]. Optics Communications, 2009, 282(2): 291-293.
- 5 Su X, Zhao R, Zhang B, *et al.* High-power passively mode-locked laser at 1062.4 nm based on Nd:LaGGG disordered crystal [J]. Applied Optics, 2015, 54(8): 2118-2122.
- 6 Zhang B Y, Xu J L, Wang G J, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Nd:GYSGG laser [J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(11): 787-790.
- 7 Agnesi A, Pirzio F, Tartara L, *et al.* 378 fs pulse generation with Nd³⁺:SrLaGa₃O₇ (Nd:SLG) disordered crystal [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(10): 105815.
- 8 Liu J, Wang Z, He K, *et al.* Passively mode-locked femtosecond laser with an Nd-doped La₃Ga₅SiO₁₄ disordered crystal [J]. Optics Express, 2014, 22(22): 26933-26938.
- 9 Kleptsyn V, Guenrikhson V, Lisauskas V, *et al.* High temperature superconducting thin films on CaGdAlO₄ substrates [J]. Journal of Crystal Growth, 1999, 196(1): 122-125.
- 10 Lagatskii A A, Kuleshov N V, Sheherbitskii V G, *et al.* Lasing characteristics of a diode-pumped Nd³⁺:CaGdAlO₄ crystal [J]. Quantum Electronics, 1997, 27(1): 15-17.
- 11 Kodama N, Crystal characterization and optical spectroscopy of Ti³⁺-doped CaGdAlO₄ crystals [J]. Physical Review B, 1998, 57(2): 811-817.
- 12 Vasylechko L, Kodama N, Matkovskii A, *et al.* Crystal structure and optical spectroscopy of CaGdAlO₄:Er single crystal [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 300-301: 475-478.
- 13 Phillips C R, Mayer A S, Klenner A, *et al.* SESAM modelocked Yb:CaGdAlO₄ laser in the soliton mode locking regime with positive intracavity dispersion [J]. Optics Express, 2014, 22(5): 6060-6077.
- 14 He K, Liu J, Wei L, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked 1079 nm Nd:CaGdAlO₄ laser [J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(1): 014203.
- 15 Hönninger C, Paschotta R, Morier-Genoud F, *et al.* Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1999, 16(1): 46-56.