

文章编号: 1001-3806(2016)06-0840-03

室温下的主动锁模 Ho:YAG 激光器

王吉, 王涛*

(中国工程物理研究院 宁波中物激光与光电技术研究所, 宁波 315100)

摘要: 为了获得在 $2\mu\text{m}$ 波段的百皮秒激光器, 采用主动锁模的方法, 使用 $\text{Tm}:\text{YLF}$ 作为抽运源, 得到了可在室温下工作的输出连续锁模脉冲的主动锁模 Ho:YAG 激光器。研究了该主动锁模激光器的输出特性, 并进行了实验验证, 取得了脉冲重复频率为 82.75MHz、输出最大平均功率为 1W、激光中心波长为 2097.25nm、斜率效率为 13.3%、锁模脉冲宽度约为 86.6ps 的实验数据。结果表明, 采用主动锁模的方式能获得输出脉宽百皮秒量级的锁模钬激光器。

关键词: 激光器; 锁模激光器; 主动锁模; Ho:YAG 激光器; 带内抽运; 自相关检测

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.014

Actively mode-locked Ho:YAG laser at room temperature

WANG Ji, WANG Tao

(Laser and Optoelectronics Technologies Institute of Ningbo, China Academy of Engineering Physics, Ningbo 315100, China)

Abstract: In order to get hundred picosecond laser at $2\mu\text{m}$ band, by using an acousto-optic modulator and $\text{Tm}:\text{YLF}$ laser as the pump source, an actively continuous wave mode-locked Ho:YAG solid-state laser was obtained at room temperature. The output characteristics of active mode-locked laser were studied. After experimental verification, the parameters of laser were obtained, such as mode-locked pulse repetition frequency of 82.75MHz, the maximal average output power of 1W, wavelength center of 2097.25nm, slope efficiency of 13.3%, and pulse width of about 86.6ps. The results show that mode-locked Ho-doped laser with 100ps pulse width could be obtained by the method of active mode-locked technology.

Key words: lasers; mode-locked laser; actively mode-locked; Ho:YAG laser; in-band pump; self-correlation detection

引言

锁模脉冲具有高峰值功率和超短脉冲的特性。超快百皮秒量级的 $2\mu\text{m}$ 激光器在很多领域都有广泛的应用, 比如微加工^[1]、激光光谱技术^[2]、医学^[3]、激发高次谐波^[4] 和非线性频率转换^[5-6] 领域等。因此, 目前对 $2\mu\text{m}$ 超快激光器的研究已成为热点之一。

钬共掺晶体可发射 $2\mu\text{m}$ 波段的激光。然而, 由于上转换能量的损耗, 钬共掺晶体必须工作在超低温下才能保证它的输出效率^[7-8]。而单掺钬晶体可用带内抽运方式工作, 即由 $1.9\mu\text{m}$ 的钬激光器抽运, 该抽运方式具有生产损耗低、产生热量少、效率高的优点^[9]。

锁模激光器又可分为主动锁模和被动锁模两种。通常情况下, 与被动锁模相比, 主动锁模能产生几十或者几百皮秒量级的宽脉冲和能量更高的脉冲序列。在

最近几年里, 关于主动锁模的 $2\mu\text{m}$ 激光器已有一些报道。比如, 最早在 1991 年就由美国海军实验室 PINTO 等人使用主动锁模的方法获得了输出 $2.01\mu\text{m}$ 的 $\text{Tm}:\text{YAG}$ 连续锁模脉冲激光, 锁模脉冲宽度为 35ps, 重复频率为 300MHz, 最大平均输出功率为 70mW^[10]。1994 年, 美国空军莱特实验室 SCHEPLER 等人使用声光调制器获得了 $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{YLF}$ 主动锁模固体激光器, 脉冲宽度为 370ps, 重复频率为 150MHz, 最大输出平均功率 300mW, 输出中心波长 2063nm^[11]。2003 年, 意大利米兰理工大学 GALZERANO 等人用同样的方法, 获得输出 2060nm 的 $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{BYF}$ 主动锁模固体激光器, 锁模脉宽为 97ps, 重复频率 100MHz, 平均功率只有 20mW^[12]。2013 年, 美国的 Q-peak 公司获得了由 1940nm 的掺钬光纤激光器抽运的主动锁模单掺 Ho:YLF 激光器, 测得脉冲宽度约为 290ps, 输出平均功率高达 4W, 重复频率为 81.36MHz^[13]。本文中报道的是可在常温下工作的关于 $2\mu\text{m}$ 波段的单掺钬主动锁模固体激光器。

1 实验装置

如上所述, 本实验中采用带内抽运方式, 由

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61308009)

作者简介: 王吉 (1989-), 男, 硕士研究生, 现主要从事近红外固体激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: tao.wang@caep-loti.com

收稿日期: 2015-09-18; 收到修改稿日期: 2015-10-09

Tm:YLF 激光器抽运单掺 Ho:YAG, 其结构如图 1 所示。抽运源是由两个光纤耦合的半导体激光器抽运的 Tm:YLF 激光器, 最大可输出功率 13.2W, 中心波长为 1908.5nm。输出光斑通过一个焦距为 150mm 的透镜经过光束变化耦合入 Ho:YAG 晶体中心, 抽运光斑半径为 0.156mm 且与谐振腔振荡光斑匹配。

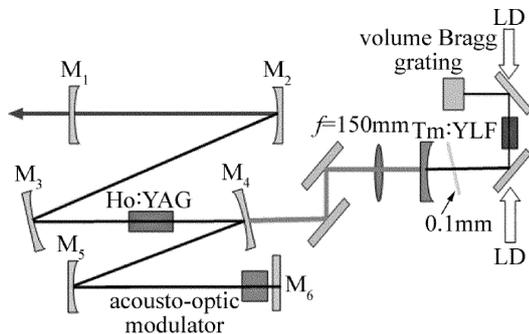


Fig. 1 Schematic setup of mode-locked Ho:YAG laser

实验中采用单掺的 Ho(原子数分数为 0.008):YAG 作为激光晶体, 尺寸为 1.5mm × 6mm × 50mm, 折射率为 1.82。晶体两端面均镀有对 1.9 μ m 和 2.1 μ m 的减反膜。晶体被铝箔包裹安装在紫铜热沉中, 由热电致冷器(thermoelectric cooler, TEC)制冷, 工作温度控制在 17 $^{\circ}$ C。输出镜 M₁ 的曲率半径为 200mm, 透过率为 10%; M₂, M₃, M₄, M₅ 皆为对 2.1 μ m 高反的凹面镜, 反射率均大于 99%, 其中 M₄ 对 1.9 μ m 抽运光高透, 透过率达 99%; M₆ 为对 2.1 μ m 全反的 0 $^{\circ}$ 镜。激光器采用的锁模声光调制晶体长 30mm, 由布儒斯特角切割, 折射率为 1.456。声光晶体放置于靠近全反镜 M₆ 处, 设置电驱动频率为 41.38MHz。全反镜被安装一个精度为 0.01mm 的平移台上, 通过微调腔长使得声波工作频率和谐振腔振荡频率一致。谐振腔的物理长度为 1755.7mm。驱动器电功率为 20W, 此时, 声光晶体对 2.1 μ m 光的透射率约为 27.5%。

2 实验及分析

当锁模声光调制器停止工作时, 输出为连续光(continuous wave, CW)。当锁模声光调制器工作且驱动频率为 41.38MHz 时, 可输出锁模脉冲。两种不同工作模式下, Ho:YAG 激光器的输出功率与输出光谱如图 2 所示, 输出光谱由 Bristol 721A IR 光谱分析仪测得。如图 2a 所示, 在最大抽运功率 13.2W 下, 获得连续光功率 3.25W, 斜率效率为 37.3%; 如图 2a 左上角所示, 此时输出中心波长为 2090.49nm。当输出为锁模脉冲光时, Ho:YAG 激光器的输出功率与光谱如图 2b 所示。由图 2b 可知, 抽运阈值为 5.9W, 此时输出平均功率只有 79mW。在最大抽运功率下输出平均功率可达 1W, 斜率效率等于 13.3%。通过比较, 发现

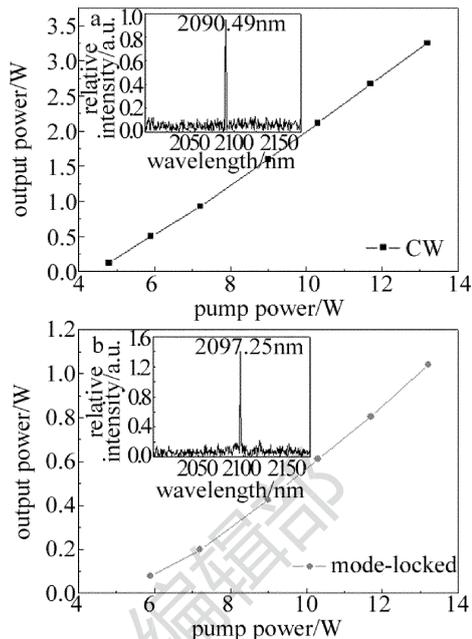


Fig. 2 Output power and spectra of Ho:YAG laser
a—at CW operation b—at mode-locked operation

最大输出功率大约降低到连续光下的 1/3, 与声光晶体 27.5% 的透光率相匹配。如图 2b 左上角所示, 此时, 锁模 Ho:YAG 激光器输出光谱的中心波长为 2097.25nm, 谱线半峰值宽度约为 1nm。

连续锁模 Ho:YAG 激光器的输出锁模脉冲序列如图 3 所示。采用带宽为 650MHz 的安捷伦示波器和响应速率为 1GHz 的光纤探测器记录波形, 示波器显示的时间精度为每一小格 5ns, 纵坐标轴上每一小格代表 10mV。图 3 显示锁模脉冲重复频率为 82.75MHz, 与声光调制器 41.38MHz 的电驱动频率和物理长度为 1755.7mm 的腔长相匹配。

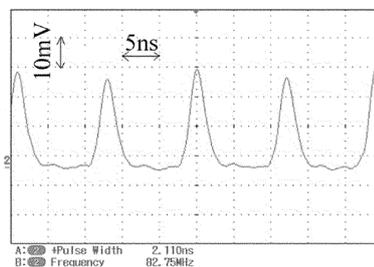


Fig. 3 Continuous wave mode-locked pulses output from actively mode-locked Ho:YAG laser within 50ns

由于示波器响应速率对于测量锁模脉宽还不够快, 因此使用自相关检测法^[14-15], 其实质就是把对超快时间的测量转变为对可控长度的测量。通过搭建无背景自相关仪测量锁模脉冲宽度^[16], 倍频晶体选用 KTP, 结果如图 4 所示, 黑色方点代表不同位置处二次谐波的相对强度, 曲线是对平均值的高斯拟合。如图 4 所示, 半峰全宽(full width at half maximum, FWHM) 大约为 122.5ps。由于输出激光为高斯型, 自相关拟

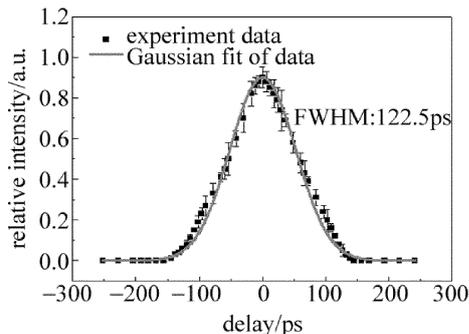


Fig. 4 Autocorrelation trace of mode-locked Ho:YAG laser

合曲线宽度与锁模脉冲宽度之间存在 1.414 的系数比,因此计算得到对应的锁模脉冲宽度约为 86.6ps。另外,采用 90/10 刀口法测量得到在输出最大功率下,光束质量因子 $M^2 = 1.15$,具有良好的光束质量。最后,通过格兰棱镜监测,输出激光为垂直偏振光。

3 结 论

获得了由 1.9 μm Tm:YLF 激光器抽运的基于声光调制的主动锁模 Ho:YAG 激光器。首先,研究了在输出连续光和锁模脉冲两种情况下, Ho:YAG 固体激光器的输出功率与输出光谱。在 Tm:YLF 激光器输出 13.2W 下,获得最大连续光输出 3.25W,此时中心波长为 2090.49nm;锁模输出时,最大平均功率为 1W,脉冲重复频率为 82.75MHz,输出中心波长为 2097.25nm。由于示波器响应速率不够快,不足以直接测量锁模脉冲宽度,因此通过自相关检测的方法间接测量了锁模脉冲的宽度,结果得到锁模脉宽为 86.6ps。最后,测量了该锁模激光器的 $M^2 = 1.15$,具有良好的光束质量。

参 考 文 献

[1] WANG L W, YE B, YIN W, *et al.* Research of energy output and gravel experiment of Cr, Tm, Ho:YAG laser [J]. Laser Technology, 2015, 39(5): 727-730 (in Chinese).
 [2] SUN R Y, LIU J, TAN F Z, *et al.* All-fiber amplification and application of 100ps laser pulse [J]. Laser Technology, 2013, 37(4):

417-420 (in Chinese).
 [3] SCHOLLE K, LAMRINI S, KOOPMANN P, *et al.* 2 μm laser sources and their possible applications [M]. Rijeka, Croatia: Intech, 2010: 471-500.
 [4] POPMINTCHEV T, CHEN M C, ARPIN P, *et al.* The attosecond nonlinear optics of bright coherent X-ray generation [J]. Nature Photonics, 2010, 4(12): 822-832.
 [5] LIPPERT E, FONNUM H, ARISHOLM G, *et al.* A 22-watt mid-infrared optical parametric oscillator with V-shaped 3-mirror ring resonator [J]. Optical Express, 2010, 18(25): 26475-26483.
 [6] YAO B Q, SHEN Y J, DUAN X M, *et al.* An Ho:YAG laser with double-pass pumping and the ZnGeP₂ OPO pumped by the Ho:YAG laser [J]. Journal of Russian Laser Research, 2013, 34(5): 503-508.
 [7] REN J C, ZHOU R L, LOU S L, *et al.* Supercontinuum generation in a standard single-mode fiber by a Q-switched Tm, Ho:YVO₄ laser [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(9): 24-28.
 [8] ZHANG X B, YAO B Q, WANG Y Z, *et al.* Quasi-four-level co-doped Tm/Ho gadolinium vanadate laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 119-122 (in Chinese).
 [9] WANG J, YAO B Q, CUI Z, *et al.* High efficiency actively Q-switched Ho:YVO₄ laser pumped at room temperature [J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(8): 085003.
 [10] PINTO J F, ESTEROWITZ L. Continuous-wave mode-locked 2 μm Tm:YAG laser [J]. Optics Letters, 1992, 17(10): 731-732.
 [11] SCHEPLER K L, SMITH B D, HEINE F, *et al.* Mode-locking of diode-pumped Tm, Ho:YLF [C]// Advanced Solid State Laser. Washington DC, USA: The Optical Society of America, 1994:257-259.
 [12] GALZRANO G, MARANO M, LONGHI S, *et al.* Sub-100ps amplitude-modulation mode-locked Tm-Ho:BaY₂F₈ laser at 2.06 μm [J]. Optics Letters, 2003, 28(21): 2085-2087.
 [13] DERGACHEV A. High-energy, kHz-rate, picosecond, 2 μm laser pump source for mid-IR nonlinear optical devices [J]. Proceedings of the SPIE, 2013, 8599:85990B.
 [14] LIU Y Z, ZHAO B. Study on phase difference algorithm based on phase-shift correlation analysis [J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 638-642 (in Chinese).
 [15] CHEN B F. Evolution in the measuring techniques of ultra-short laser pulses [J]. Modern Physics, 2005, 22(4): 585-590 (in Chinese).
 [16] YU H. Study on measurement of femtosecond laser pulse width [J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 679-681 (in Chinese).