

钛宝石激光抽运的被动锁模Tm:YAG陶瓷 激光实验研究*

詹敏杰¹⁾ 邹育婉¹⁾ 林清峰²⁾ 王兆华¹⁾ 韩海年¹⁾ 吕亮²⁾
魏志义^{1)†} 章建³⁾ 唐定远³⁾

1)(中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190)

2)(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

3)(新加坡南洋理工大学, 新加坡 639798)

(2013年7月24日收到; 2013年9月18日收到修改稿)

本文采用连续钛宝石激光作抽运, 掺杂浓度为6 at. %、长度为2.7 mm的Tm:YAG陶瓷作增益介质, 通过引入半导体饱和吸收体获得了稳定的被动锁模运转. 实验获得的激光锁模功率为116.5 mW, 中心波长为2007 nm, 重复频率为109 MHz, 通过自行搭建的腔外非共线强度自相关测量得到的脉冲宽度是55 ps.

关键词: 2 μm 波长, Tm:YAG, 陶瓷激光器, 被动锁模

PACS: 42.60.Fc, 42.72.Ai, 42.70.Hj

DOI: 10.7498/aps.63.014205

1 引言

中红外超短脉冲激光由于广泛的应用, 是激光研究的重要方向之一. 运转于2 μm 波段的固体激光器的被动锁模研究在最近几年里尤其得到了人们的重视, 该波段的超短脉冲激光不仅是开展激光医疗、激光光谱研究等的重要手段, 而且通过放大后可望成为强场物理、阿秒激光等前沿研究需求的理想驱动光源, 具有重要的学术意义和应用前景. 到目前为止, 在2 μm 超短脉冲激光的产生研究中, 人们已经在钨酸盐^[1-5]、石榴石^[6,7]、倍半氧化物^[8,9]、氟化物^[10,11]等多种晶体材料上实现了连续锁模激光输出, 最短的脉冲宽度达175 fs^[9].

Tm:YAG晶体由于具有良好的热机械性能和高的损伤阈值, 是性能优异的红外可调谐激光晶体. 首先, 掺杂Tm³⁺的增益介质可以采用商用785 nm的半导体激光器抽运. 其次, 由于Tm³⁺能级存在交叉弛豫过程(cross relaxation), 量子效率可以达

到200%^[12]. 再次, Tm:YAG晶体覆盖1.87—2.16 μm 波段的宽调谐范围^[13], 非常适用于超短脉冲激光的产生. 目前采用Tm:YAG晶体已经实现了高功率高效率的红外激光输出, 但是还没有被动锁模的研究报道. 同时由于晶体的生长周期长, 难以制作成较大的尺寸以及Tm³⁺的掺杂浓度较低等因素, 限制了其在大功率激光器研究中的发展.

在目前已有的新型红外激光材料中, 陶瓷激光材料由于兼具大尺寸和良好的光学性能, 已成为高功率高能量激光器最有竞争力的优异增益介质. 陶瓷材料制作周期短, 能够同时满足大尺寸生长与高浓度掺杂, 具有与晶体相比拟的热学和机械性能. 随着陶瓷工艺的发展, 部分陶瓷的散射损耗以及抗热性已经优于单晶材料^[14,15]. 近年来, Tm:YAG陶瓷的激光性能逐渐开展起来^[16-20], 2009年, 上海光机所首次实现了LD抽运的Tm:YAG陶瓷激光器^[16]. 他们采用792 nm的半导体激光器作为抽运源, 得到的连续激光输出功率为4.5 W, 斜效率为20.5%. 2011年他们将激光斜效率提高到36.5%, 连

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB821304, 2013CB922402)和国家自然科学基金(批准号: 60808007, 10804128)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

续输出功率为 17.2 W^[17]. 同时利用主动调 Q(声光调 Q) 的方法实现了 69 ns 的脉冲激光, 单脉冲能量为 20.4 mJ^[17]. 中科院理化所采用 805 nm 的抽运光也实现了 Tm:YAG 陶瓷的连续激光输出, 最大的输出功率为 7.1 W, 斜效率为 10.7%^[18]. 上海交通大学采用 786 nm 的半导体激光器抽运 Tm:YAG 陶瓷, 得到了 6.05 W 的连续激光输出, 斜效率高达 65%^[19]. 最近, 哈尔滨工业大学报道了室温下二极管抽运 Tm:YAG 陶瓷的单频可调谐输出^[20]. 我们研究组在 2010 年开展了钛宝石激光器抽运 Tm:YAG 陶瓷的连续激光输出研究, 得到的斜效率为 42.1%^[21].

本文采用掺杂浓度为 6 at.% 的 Tm:YAG 陶瓷作为增益介质, 在连续钛宝石激光抽运下, 采用半导体可饱和吸收体实现了 Tm:YAG 陶瓷激光器的被动锁模输出. 输出功率为 116.5 mW, 重复频率为 109 MHz, 中心波长为 2007 nm. 据我们所知, 目前国际上还没有 Tm:YAG 陶瓷激光器连续被动锁模的实验报道.

2 Tm:YAG 陶瓷的光谱性质

实验中使用的增益介质是掺杂浓度为 6 at.% 的 Tm:YAG 陶瓷, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 2.7 mm.

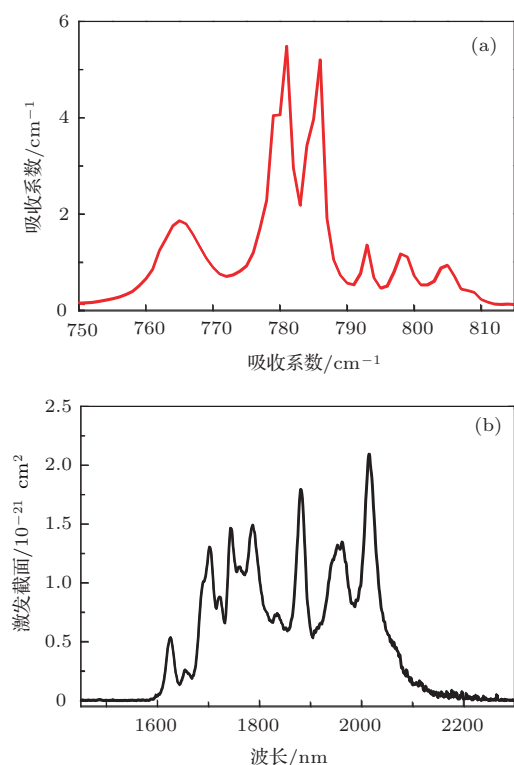


图1 室温下 Tm:YAG 陶瓷的吸收谱 (a) 和荧光光谱 (b)

陶瓷样品由新加坡南洋理工大学提供. 室温下的吸收谱和发射谱如图 1 所示. 由于采用的光谱仪的分辨率为 0.5 nm (光谱仪型号 Cary 5000 Spectrophotometer), 扫描步长为 1 nm, 导致吸收谱曲线存在一定突变. 从图 1 (a) 可以看出, Tm:YAG 陶瓷的吸收峰位于 781 和 786 nm, 这两个吸收峰的半宽均为 3 nm, 吸收系数分别为 5.49 cm⁻¹ 和 5.21 cm⁻¹. 根据图 1 (b), Tm:YAG 陶瓷的发射峰位于 2015 nm, 发射峰的半宽为 31 nm, 发射截面为 2.10×10^{-21} cm², 该宽发射谱非常适合超短脉冲的产生.

3 实验装置

实验装置如图 2 所示. 实验采用的抽运源是一台自建的连续输出的钛宝石激光器, 中心波长位于 786 nm, 最高输出功率为 4.1 W. Tm:YAG 陶瓷前后表面均镀有对 786 nm 和 2000 nm 的增透膜. 腔型采用折叠腔结构, 其中 M₁, M₂ 为曲率半径 100 mm 的宽带双色凹面镜, 其对 786 nm 波段抽运激光透过率大于 95%, 对 1900—2100 nm 波段的反射率大于 99.9%. 抽运光通过一片焦距为 100 mm 的凸透镜 L 聚焦到增益介质中. 为了避免损伤激光介质, 陶瓷用铝箔包裹后夹持在紫铜冷却片内, 并采用循环水系统对紫铜晶体夹进行冷却, 水温维持在 12 °C. 腔的一端为透过率 1.5% 的输出镜 OC, 另一端用一片曲率半径为 200 mm 的凹面镜 M₃ 将激光聚焦在高反镜 HR 上, 高反镜对 1900—2100 nm 波段反射率可达 99.8%.

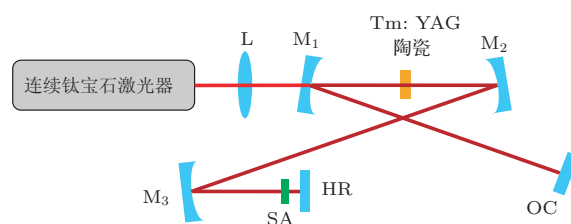


图2 被动锁模 Tm:YAG 陶瓷实验装置图 (M₁, M₂, M₃ 为平凹镜, OC 为输出镜, HR 为高反镜, SA 为半导体可饱和吸收体)

4 实验结果与分析

在连续被动锁模实验中, 调 Q 现象应该被抑制. 实现连续被动锁模的条件可由下面的方程描述^[22]:

$$E_p^2 > E_{\text{sat,L}} E_{\text{sat,A}} \Delta R, \quad (1)$$

其中, E_p 为腔内脉冲能量 $E_p = \frac{P_{\text{intra}}}{f_{\text{rep}}}$, P_{intra} 是腔内平均功率, f_{rep} 是脉冲的重复频率; $E_{\text{sat,L}}$ 表示激光介质上的饱和能量, $E_{\text{sat,L}} = \frac{h\nu}{m\sigma_L} \cdot \pi\omega_L^2$, m 为脉冲在谐振腔内循环一周经过激光介质的次数, σ_L 为激光增益介质的受激发射截面, ω_L 代表激光介质上的光斑束腰; $E_{\text{sat,A}}$ 表示吸收体的饱和能量, $E_{\text{sat,A}} = F_{\text{sat,A}} \cdot \pi\omega_A^2$, $F_{\text{sat,A}}$ 代表吸收体的饱和通量, ω_A 为吸收体上的光斑束腰; ΔR 为吸收体的调制深度. 从(1)式分析得到, 稳定的连续锁模脉冲可以通过以下几种方法得到: 选择受激发射截面较大的激光介质材料; 选择调制深度较小的饱和吸收体; 选择腔长较长的谐振腔以降低脉冲重复频率以及减小增益介质上和饱和吸收体上的光斑大小.

实验采用调制深度较小的半导体可饱和吸收体 SA 作为锁模元件, 其调制深度为 0.6%, 饱和能流密度为 $300 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, 非饱和吸收损失和弛豫时间分别为 0.4% 和 500 fs. 在未放半导体可饱和吸收体 (SA) 的情况下, 谐振腔优化到最佳状态, 然后在高反镜 HR 前放入 SA, 使 SA 尽可能的靠近 HR. 为了实现被动连续锁模, 我们合理设计了晶体上以及 SA 上的光斑面积, 根据 ABCD 矩阵模拟了腔内的模式分布. 计算得到陶瓷上和 SA 上的光斑束腰分别为 $41 \mu\text{m} \times 37 \mu\text{m}$, $60 \mu\text{m} \times 58 \mu\text{m}$. 整个腔长为 1.37 m, 对应脉冲重复频率为 109 MHz.

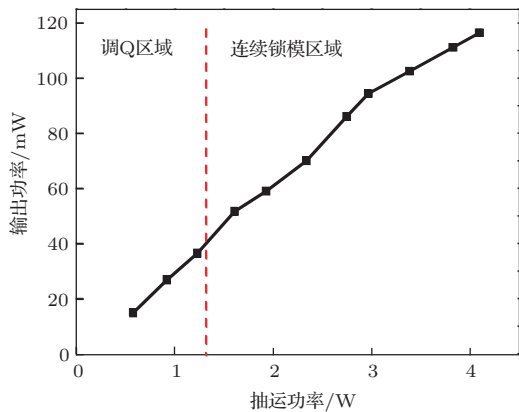


图3 连续锁模脉冲输出功率图

经过对激光腔的优化调节, 当抽运功率增加为 1.26 W 时, 我们得到了稳定的连续锁模. 图 3 显示了锁模输出功率与输入抽运光功率的变化曲线. 在抽运功率为 4.1 W 时锁模脉冲的输出功率为 116.5 mW, 对应的光光转换效率为 2.84%. 用示波器检测得到的脉冲锁模信号如图 4 所示, 图 4(a) 为时间尺度为 20 ns 的脉冲锁模序列, 图 4(b) 为时间尺度为

200 ns 的脉冲锁模序列. 图 4 中显示的脉冲的重复频率为 108.7 MHz.

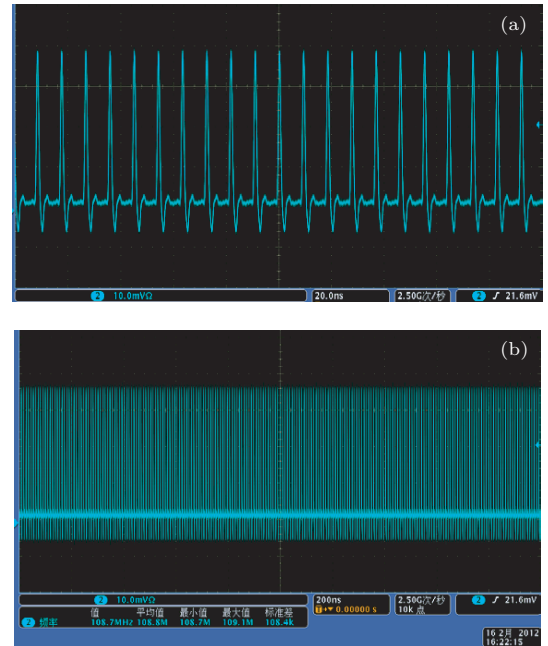


图4 示波器显示的稳定锁模脉冲序列 (a) 20 ns; (b) 200 ns

实验中的锁模脉冲非常稳定, 可以维持 5 h 以上, 功率计监测的功率跳动在 2 mW 以内. 采用 Ocean optics 的光谱仪 (分辨率为 6 nm) 测量锁模激光脉冲的输出波长, 光谱图如图 5 所示, 中心波长为 2007 nm, 光谱带宽为 6 nm. 由于所用的光谱仪分辨率是 6 nm, 所以实际的光谱宽度有待用更高分辨率的光谱仪进行精确测量.

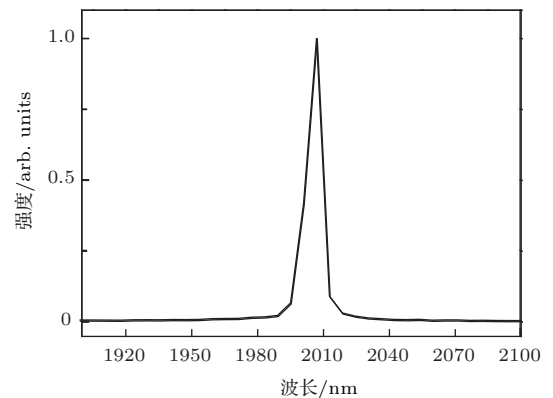


图5 稳定锁模的激光输出光谱曲线

为了测量锁模激光脉宽, 我们自行搭建了一台非共线强度自相关仪. 通过采用 30 mm 厚的 LiNbO₃ 晶体和频延时自动控制的两相关光束, 得到的强度自相关信号如图 6 所示, 假设脉冲形状为双曲正割函数, 拟合得到的脉冲宽度为 55 ps. 考虑到大

厚度倍频晶体及其他元件所引入的色散, 因此实际的脉冲宽度要短于这一结果. 虽然采用薄晶体减少色散可以测得更短的结果, 但我们实验中发现很难得到和频相关信号. 目前进一步补偿色散及压缩脉宽的实验研究正在进行中, 通过腔内色散的优化补偿及锁模功率的提高, 我们预期采用更薄的倍频晶体测量得到短于 10 ps 的相关信号, 是完全可能的.

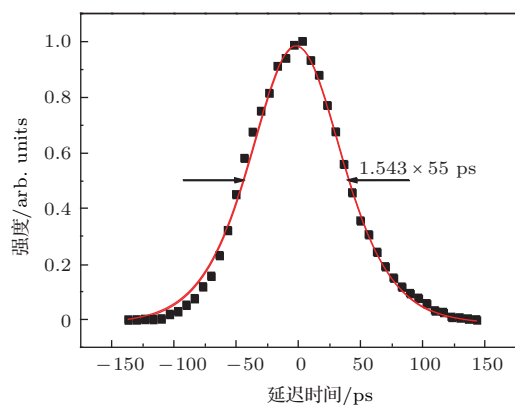


图6 Tm:YAG 陶瓷锁模脉冲宽度

5 结 论

我们首次在 Tm:YAG 陶瓷上实现了稳定的连续被动锁模激光运行. 实验中所用的 Tm:YAG 陶瓷的掺杂浓度为 6 at.%, 长度为 2.7 mm. 采用半导体可饱和吸收体作为锁模元件, 经过合理的优化腔型参数, 获得的稳定被动锁模激光输出功率为 116.5 mW, 中心波长为 2007 nm, 重复频率为 109 MHz, 脉冲宽度是 55 ps. 据我们所知, 这是在 2 μ m 陶瓷材料上获得的首次连续被动锁模激光运转. 我们的工作证实了 Tm:YAG 陶瓷是一种能够用于高功率、高效率超快激光产生的优质激光介质. 我们相信采用 Tm:YAG 陶瓷结合色散补偿元件有望获得更加优良的锁模激光脉冲输出.

参考文献

- [1] Lagatsky A A, Fusari F, Calvez S, Gupta J A, Kisel V E, Kuleshov N V, Brown C T A, Dawson M D, Sibbett W 2009 *Opt. Lett.* **34** 2587
- [2] Lagatsky A A, Fusari F, Calvez S, Kurilchik S V, Kisel V E, Kuleshov N V, Dawson M D, Brown C T A, Sibbett W 2010 *Opt. Lett.* **35** 172

- [3] Lagatsky A A, Calvez S, Gupta J A, Kisel V E, Kuleshov N V, Brown C T A, Dawson M D, Sibbett W 2011 *Optics Express* **19** 9995
- [4] Lagatsky A A, Han X, Serrano M D, Cascales C, Zaldo C, Calvez S, Dawson M D, Gupta J A, Brown C T A, Sibbett W 2010 *Opt. Lett.* **35** 3027
- [5] Cho W B, Schmidt A, Yim J H, Choi S Y, Lee S, Rotermund F, Griebner U, Steinmeyer G, Petrov V, Mateos X, Pujol M C, Carvajal J J, Aguiló M, Díaz F 2009 *Optics Express* **17** 11007
- [6] Yang K, Bromberger H, Ruf H, Schfer H, Neuhaus J, Dekorsy T, Grimm C V, Helm M, Biermann K, Künzel H 2010 *Optics Express* **18** 6537
- [7] Ma J, Xie G Q, Gao W L, Yuan P, Qian L J, Yu H H, Zhang H J, Wang J Y 2012 *Opt. Lett.* **37** 1376
- [8] Lagatsky A A, Koopmann P, Fuhrberg P, Huber G, Brown C T A, Sibbett W 2012 *Opt. Lett.* **37** 437
- [9] Schmidt A, Koopmann P, Huber G, Fuhrberg P, Choi S Y, Yeom D, Rotermund F, Petrov V, Griebner U 2012 *Optics Express* **20** 5313
- [10] Coluccelli N, Galzerano G, Gatti D, Lieto A D, Tonelli M, Laporta P 2010 *Applied Physics B: Lasers and Optics* **101** 75
- [11] Coluccelli N, Lagatsky A, Lieto A D, Tonelli M, Galzerano G, Sibbett W, Laporta P 2011 *Opt. Lett.* **36** 3209
- [12] Sato A, Asai K, Itabe T 1998 *Appl. Opt.* **37** 6395
- [13] Stoneman R C, Efficient L E 1990 *Opt. Lett.* **15** 486
- [14] Ueda K 2007 3rd Laser Ceramic Symposium Paris, October, 2007
- [15] Yang X B, Shi Y, Li H J, Bi Q Y, Su L B, Liu Q, Pan Y B, Xu J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8050 (in Chinese) [杨新波, 石云, 李红军, 毕群玉, 苏良碧, 刘茜, 潘裕柏, 徐军 2009 物理学报 **58** 8050]
- [16] Cheng X J, Xu J Q, Zhang W X, Jiang B X, Pan Y B 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 074204
- [17] Zhang S Y, Wang M J, Xu L, Wang Y, Tang Y L, Cheng X J, Chen W B, Xu J Q, Jiang B X, Pan Y B 2011 *Opt. Express* **19** 727
- [18] Ma Q L, Bo Y, Zong N, Pan Y B, Peng Q J, Cui D F, Xu Z Y 2011 *Optics Communications* **284** 1645
- [19] Gao W L, Ma J, Xie G Q, Zhang J, Luo D W, Yang H, Tang D Y, Ma J, Yuan P, Qian L J 2012 *Opt. Lett.* **37** 1076
- [20] Yao B Q, Yu X, Ju Y L, Liu W B, Jiang B X, Pan Y B 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 024210
- [21] Zou Y W, Zhang Y D, Zhong X, Wei Z Y, Zhang W X, Jiang B X, Pan Y B 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 074213
- [22] Honninger C, Paschotta R, Morier G F, Moser M, Keller U 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 46

Ti: sapphire pumped passively mode-locked Tm:YAG ceramic laser^{*}

Zhan Min-Jie¹⁾ Zou Yu-Wan¹⁾ Lin Qing-Feng²⁾ Wang Zhao-Hua¹⁾ Han Hai-Nian¹⁾
Lü Liang²⁾ Wei Zhi-Yi¹⁾[†] Zhang Jian³⁾ Tang Ding-Yuan³⁾

1) (Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, 710071, China)

3) (School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, 639798, Singapore)

(Received 24 July 2013; revised manuscript received 18 September 2013)

Abstract

A passively mode-locked Tm:YAG ceramic laser was demonstrated. Employing a 6 at.% Tm³⁺-doped sample with a length of 2.7 mm, we have realized stable mode-locked pulses with a repetition rate of 109 MHz by a semiconductor saturable absorber. A maximum output power of 116.5 mW was obtained at the central wavelength of 2007 nm. The corresponding pulse duration was determined to be 55 ps by a self-built noncollinear intensity auto-correlation setup. It is shown that Tm:YAG ceramics are excellent laser materials which can be used in ultrafast lasers with high-power and high-efficiency output.

Keywords: 2 μm , Tm:YAG, ceramic laser, passively mode-locked

PACS: 42.60.Fc, 42.72.Ai, 42.70.Hj

DOI: 10.7498/aps.63.014205

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2012CB821304, 2013CB922402), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60808007, 10804128).

[†] Corresponding author. E-mail: zywei@iphy.ac.cn