

高功率掺镱全固态飞秒激光器

于 晨¹, 田文龙¹, 朱江峰^{1*}, 魏志义², 徐晓东³

- (1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;
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, 江苏 徐州 221116)

摘要: 开展了激光二极管泵浦的高功率掺镱全固态飞秒激光器的研究。利用 Yb:LYSO 晶体实现了高功率高效率的半导体可饱和吸收镜锁模飞秒振荡器, 分别在 1 035、1 042 nm 实现了 3 W 的稳定锁模运转, 相应的脉冲宽度分别为 351、287 fs, 斜效率分别为 88.2% 和 89.7%; 通过将增益介质与克尔介质分开, 利用大功率多模 LD 直接泵浦 Yb:CYA 晶体实现了高功率的克尔透镜锁模飞秒振荡器, 脉冲宽度 70 fs, 平均输出功率 2.52 W, 重复频率 50 MHz, 获得了 50 nJ 的单脉冲能量且峰值功率达到 0.71 MW。表明上述掺镱晶体在高功率二极管泵浦全固态激光器领域中具有非常优异的性能。

关键词: 掺镱飞秒固体激光器; 激光二极管; 高平均功率; 亚百飞秒脉冲

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1105001

High power Yb-doped all-solid-state femtosecond lasers

Yu Chen¹, Tian Wenlong¹, Zhu Jiangfeng^{1*}, Wei Zhiyi², Xu Xiaodong³

- (1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Laser diode pumped high-power Yb-doped all-solid-state femtosecond lasers were developed. Firstly, a high-power and high-efficiency Yb:LYSO femtosecond oscillator was realized by passively mode-locking technique using semiconductor saturable absorber mirror. Stable mode-locking operations at 1 035 nm and 1 042 nm with both as high as 3 W average output power were achieved, respectively. The corresponding pulse width was 351 fs and 287 fs, the slope efficiency is 88.2% and 89.7% respectively. Secondly, stable 70 fs pulses with the average power of 2.52 W were directly generated from a high power multimode diode-pumped Yb:CYA laser with Kerr-lens mode-locking technology. By separating the gain medium and Kerr medium, the single pulse energy and the peak power was up to 50 nJ and 0.71 MW, respectively. It is shown that the above erbium-doped crystals have excellent performance in the field of high-power diode-pumped all-solid-state lasers.

Key words: Yb femtosecond solid-state laser; laser diode; high average power; sub-100 femtosecond pulses

收稿日期: 2019-09-11; 修订日期: 2019-10-21

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2017YFB0405202); 国家自然科学基金(11774277);

脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金(SKL2017KF 04)

作者简介: 于晨(1994-), 男, 硕士生, 主要从事全固态激光技术方面的研究。Email: 532635799@qq.com

导师简介: 朱江峰(1980-), 男, 教授, 博士, 主要从事超快激光技术方面的研究。Email: jfzhu@xidian.edu.cn

0 引言

高功率飞秒激光器在工业、医疗和科学研究等领域有着很多方面的应用并引起了人们的广泛研究。目前最成熟的高功率飞秒激光器是基于掺钛蓝宝石的克尔透镜锁模激光器,但钛宝石激光由于受限于现有的泵浦源功率以及晶体本身的量子效率,目前从锁模振荡器输出的平均功率不超过 4 W。相比之下,基于掺镱(Yb^{3+})增益介质全固态飞秒激光器具有更大的潜力,对于需要高平均功率、窄脉冲的高精尖应用,比如飞秒激光微加工、高重频高次谐波产生等,全固态飞秒激光器具有更为明显的先天优势。截至目前,人们已经成功生长、制备了多种掺 Yb 激光介质,并可以借助被动锁模技术或者克尔透镜锁模(Kerr-Lens Mode-locking, KLM)技术实现高功率飞秒激光输出,例如 Yb:YAG^[1], Yb:KYW^[2], Yb:YCOB^[3], Yb:Lu₂O₃^[4], Yb:LuScO₃^[5], Yb:SSO^[6], Yb:CaF₂^[7], Yb:CALGO^[8], Yb:KGW^[9], Yb:CYA^[10], Yb:YSO^[11]等晶体。产生高功率飞秒脉冲的关键因素是增益介质的良好导热性和激光器的热管理。而保持高平均功率输出的同时获得小于亚 100 fs 的超短脉冲还需要增益晶体具有足够宽的增益发射光谱。在众多掺镱增益介质中,有两种材料非常适合用于产生高功率飞秒脉冲:Yb:LuYSiO₅(Yb:LYSO)晶体和 Yb:CaYAIO₄(Yb:CYA)晶体。

Yb:LYSO 晶体具有优异的激光性能与物理性质。在 Yb:LYSO 晶体中, Yb^{3+} 离子的基态能级分裂为 993 cm^{-1} , 使其拥有准四能级结构与较低的泵浦阈值。Yb:LYSO 晶体具有 70 nm 半高全宽的荧光发射光谱,能够支持产生亚 50 fs 的超短脉冲。2006 年,报道了 Yb:LYSO 晶体在室温下的吸收与发射光谱^[12]。其主吸收峰 977 nm 的吸收截面为 $1.13 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 相应地在 1 033 nm 的发射截面为 $0.22 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 并且 Yb:LYSO 晶体(5 at.% 掺杂)的热导率高达 $5 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。以上的特性表明 Yb:LYSO 晶体具有产生高功率超短脉冲的潜质。目前,基于 Yb:LYSO 晶体的连续光及被动锁模性质的研究已被多次报道。2006 年实现了 7.8 W 连续光运转的 Yb:LYSO 激光器,其斜效率为 96%^[12]。2011 年首次通过 SESAM 被动锁模技术实现了飞秒 Yb:LYSO 激光器,其脉冲宽度 780 fs^[13]

2012 年通过 SWCNT 被动锁模实现了中心波长 1 045.5 nm 和 1 059.0 nm 的双波长锁模 Yb:LYSO 激光器,脉冲宽度为 8 ps^[14]。2014 年 Yb:LYSO 激光器利用克尔透镜锁模技术得到 61 fs 的超短脉冲^[15]。但上述实验结果中由 Yb:LYSO 激光器得到的最大峰值功率只有 13.1 kW,仍有很大的进步空间。

Yb:CYA 晶体同样具有优良的性质且更容易生长和制备,由于 Ca^{2+} 与 Y^{3+} 离子的随机分布和电荷差使其发射光谱得到了极大的展宽, Yb:CYA 晶体 σ 偏振方向的荧光光谱半高全宽宽达 77 nm, 支持产生傅里叶变换极限脉冲宽度为 15 fs 的激光脉冲的输出,其荧光寿命约为 426 μs 。Yb:CYA 晶体在 a 轴与 c 轴的热导率分别达到了 $\kappa_a = 3.6 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 与 $\kappa_c = 3.2 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。2011 年首次报道了飞秒 Yb:CYA 振荡器,得到平均输出功率 740 mW,脉冲宽度 156 fs 的激光脉冲^[16]。受益于 Yb:CYA 晶体非常宽且平滑的荧光光谱, Pirzio 等人使用单模半导体激光器泵浦 Yb:CYA, 得到亚 50 fs 宽带可调谐的 Yb:CYA 激光器,最短脉冲宽度 43 fs, 波长调谐范围达到 40 nm^[17]。最近,由克尔透镜锁模 Yb:CYA 振荡器与石墨烯被动锁模 Yb:CYA 振荡器分别得到了 33 fs^[18] 的脉冲和 30 fs^[19] 的脉冲,上述实验都证明 Yb:CYA 晶体是产生亚 50 fs 激光脉冲的优异激光晶体,但以上超短脉冲振荡器产生的激光功率只有数十 mW,难以直接得到亚百飞秒、瓦级输出的飞秒脉冲。

针对以上两种晶体,文中通过利用基于半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)被动锁模技术以及克尔透镜锁模(KLM)技术分别对它们进行了高功率飞秒激光产生研究。首先采用高功率高亮度激光二极管(Laser Diode, LD)泵浦 Yb:LYSO 晶体,分别在 1 035 nm 和 1 042 nm 实现了 3 W 的稳定被动锁模运转,相应的脉冲宽度分别为 351 fs、287 fs,峰值功率分别为 97、118 kW,斜效率分别为 88.2% 和 89.7%;其次采用将增益介质与克尔介质分离的双聚焦谐振腔结构,克服了传统克尔透镜锁模中激光晶体同时作为增益介质和克尔介质的困难,通过 LD 泵浦 Yb:CYA 晶体得到了高功率克尔透镜锁模飞秒激光器,相应的脉冲宽度 70 fs,平均功率 2.52 W。

1 Yb:LYSO 晶体锁模实验

1.1 实验装置

SESAM 被动锁模的 Yb:LYSO 固体激光器实验装置如图 1 所示。谐振腔采用“Z”型折叠腔。实验中采用通光长度 3 mm, 掺杂浓度 5at.% 的 Yb:LYSO 晶体作为激光增益介质, 泵浦源为一台光纤耦合输出的 976 nm 稳波长 LD, 纤芯直径 105 μm, 数值孔径(NA)0.22, 光纤输出的泵浦光通过 1:1 的耦合系统聚焦到晶体中心。M1 为平面双色镜, 镀有 1 020~1 120 nm 的高反膜和 800~1 000 nm 的增透膜。C1、C2 和 C3 分别为曲率半径为 200、200、300 mm 的凹面镜。GTI(Gires - Tournois interferometer)镜在 1 035~1 055 nm 范围提供 -1 200 fs² 的色散补偿量。实验中使用两个不同的输出镜 OC, 其透过率分别为 4.5% 和 10%。SESAM 用来启动锁模。晶体中心的泵浦光束腰半径和激光束腰半径分别为 52.5、50 μm, 后者略小前者, 形成了非常好的模式匹配。总腔长 1.74 m, 对应的重复频率为 86.4 MHz。

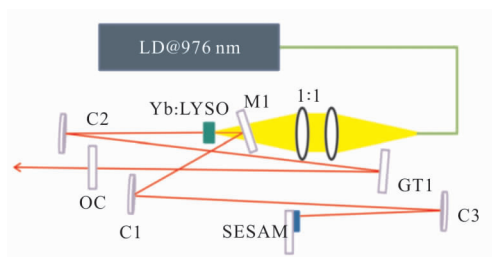


图 1 Yb:LYSO 锁模激光器的实验装置图

Fig.1 Experimental setup of the mode-locked Yb:LYSO laser

1.2 实验结果与分析

实验中, 首先利用一片平面高反镜取代 SESAM, 并将连续光输出功率优化至最大。图 2 为分别利用 4.5% 和 10% 的 OC 得到的连续光输出功率曲线。当入射的泵浦功率为 11.5 W 时, Yb:LYSO 晶体吸收的泵浦光功率达到 5.6 W, 此时使用 4.5% 和 10% 的 OC 可获得最大输出功率分别为 3.77、3.89 W, 相应的斜效率分别为 85.6%、92.1%。使用 10% OC 得到的平均功率与斜效率都略大于 4.5% OC。为了实现被动锁模, 将平面高反镜替换为中心波长 1 040 nm 的 SESAM, 其调制深度、饱和能流密度和弛豫时间分别是 1.2%、60 μJ/cm² 和 1 ps。通过仔细调节 SESAM 的位置, 当晶体吸收的泵浦

光大于 2.5 W 时即可实现稳定的锁模运转, 继续增加泵浦功率, 当晶体吸收泵浦功率达到 5.2 W 时, 仍能得到稳定的锁模运转。如图 3 所示, 锁模运转下使用 4.5% 和 10% 的 OC 获得的最大平均输出功率分别为 1.6、3 W, 相应的斜效率分别为 49.8% 和 88.2%。

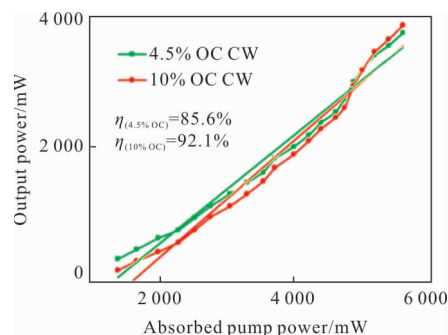


图 2 Yb:LYSO 激光器 4.5% 和 10% OC 连续光输出功率特性

Fig.2 Output power characteristics of the CW Yb:LYSO laser with 4.5% and 10% OCs

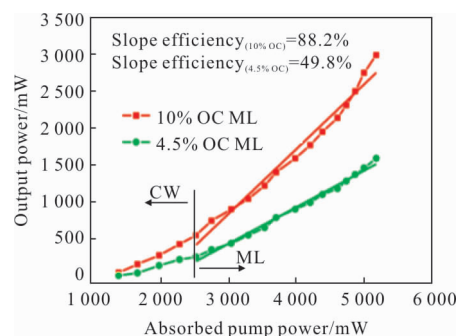


图 3 1 035 nm 锁模运转的输出功率特性

Fig.3 Output power characteristics of 1 035 nm mode-locking operation

在 3 W 的最大输出功率下, 使用商用光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6370C)测量了锁模激光的光谱曲线, 如图 4(a)所示。相应的锁模光谱中心波长在 1 035 nm 附近, 半高全宽为 4.4 nm, 通过傅里叶变换可支持 221 fs 的傅里叶变换极限脉冲。使用商用自相关仪 (FR-103MN, Femtochrome Research, Inc.)测量锁模激光脉冲的自相关曲线, 如图 4(b)所示。从图中可以得到激光脉冲的自相关曲线半高全宽为 541 fs, 假设使用双曲正割拟合, 脉冲宽度为 351 fs。使用光斑分析仪 (Beam Analyzer USB, Duma Optics)测量了 1 035 nm 锁模脉冲的光束质量, 如图 5(a)所示。在最大输出功率下, 飞秒脉冲仍保持

良好的基模模式,其中在 x 方向和 y 方向上的 M^2 分别是 1.2、1.3。用商用射频频谱分析仪(R&S FSVA40)又测量其频谱,基频信号 86.4 MHz 的信噪比为 63.4 dBc,如图 5(b)所示。

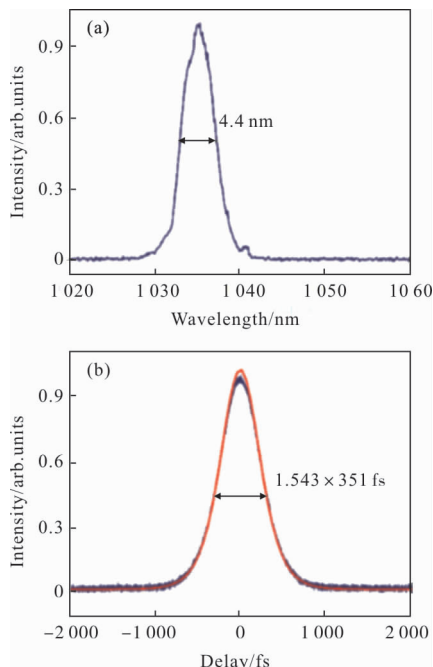


图 4 1 035 nm 锁模脉冲的(a)光谱和(b)强度自相关曲线
Fig.4 Spectrum (a) and intensity autocorrelation curve (b) of 1 035 nm mode-locked pulse

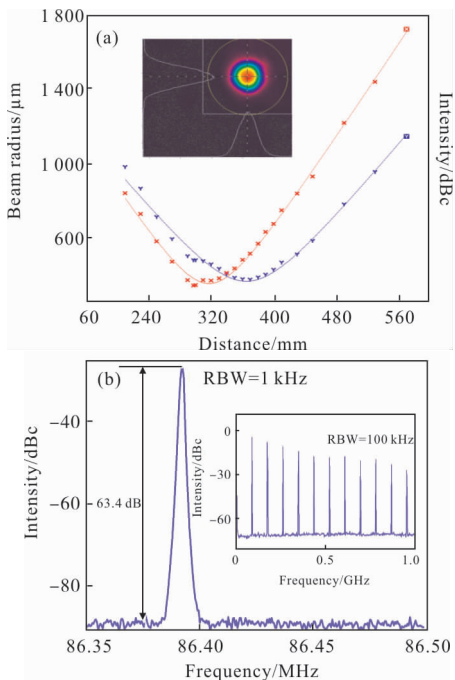


图 5 1 035 nm 锁模脉冲的(a) M^2 因子和(b)射频频谱图
Fig.5 M^2 factor (a) and radio frequency spectra (b) of the 1 035 nm mode-locked pulse

实验中发现,仅通过简单调节 SESAM 的角度也可以得到中心波长为 1 042 nm 的锁模运转。锁模运转下使用 4.5%和 10%的 OC 获得的最大平均输出功率分别为 1.75 W、3.07 W,相应的斜效率分别为 53.4%和 89.7%,如图 6 所示。图 7(a)为 1 042 nm 锁模激光的光谱曲线,锁模光谱中心波长在 1 042 nm 附近,半高全宽为 4.3 nm,通过傅里叶变换可支持 265 fs 的傅里叶变换极限脉冲。图 7(b)为测量锁模激光脉冲的自相关曲线,从图中可以得到激光脉冲的自相关曲线半高全宽为 458 fs,假设使用双曲正弦拟合,脉冲宽度为 297 fs,则其相应的时间带宽积为 0.353,略大于傅里叶变换限值 0.315,在 1 042 nm 波长附近,

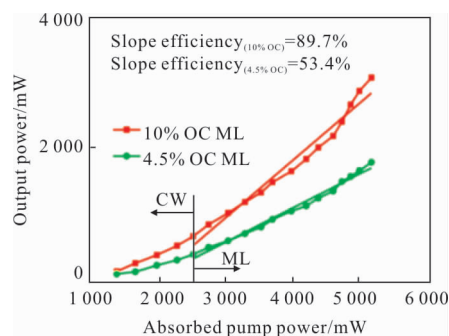


图 6 1 042 nm 锁模运转的输出功率特性
Fig.6 Output power characteristics of 1 042 nm mode-locking operation

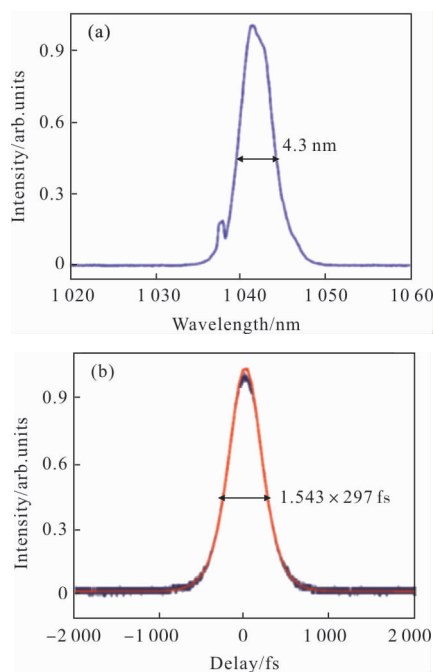


图 7 1 042 nm 锁模脉冲的(a)光谱和(b)强度自相关曲线
Fig.7 Spectrum (a) and intensity autocorrelation curve (b) of 1 042 nm mode-locked pulse

腔内正色散得到了较好的补偿。图 8(a)为测量锁模脉冲的光束质量,锁模脉冲在 x 方向和 y 方向上的 M^2 分别是 1.3 和 1.4。图 8(b)为锁模稳定运转时的频谱,基频信号 86.4 MHz 的信噪比为 64.8 dBc。1 042、1035 nm 锁模运转在 3 h 内的功率稳定性如图 9 所示,可以看出

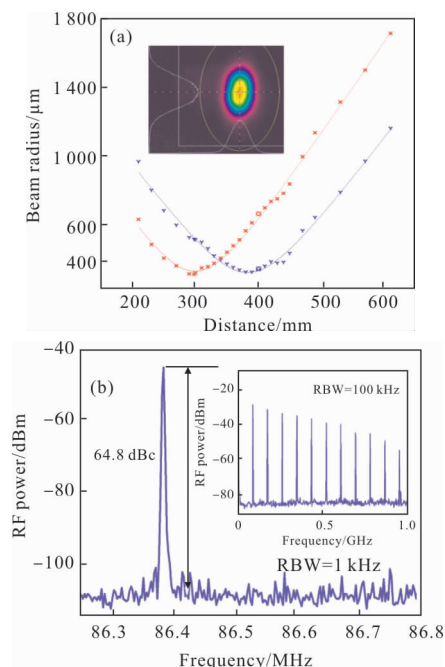


图 8 1 042 nm 锁模脉冲的 (a) M^2 因子和 (b) 射频频谱图
Fig.8 M^2 factor (a) and radio frequency spectra (b) of the 1 042 nm mode-locked pulse

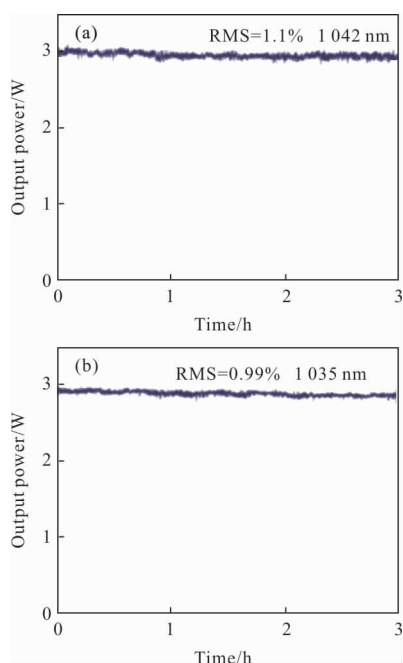


图 9 1 035、1 042 nm 锁模运转的长时间功率稳定性
Fig.9 Long-time power stability of 1 035 nm and 1 042 nm mode-locking operation

其功率抖动只有 1%,且不会发射跳模现象。

2 Yb:CYA 晶体克尔透镜锁模实验

2.1 实验装置

Yb:CYA 克尔透镜锁模实验装置图如图 10 所示。实验中采用通光长度 6 mm,沿 a 轴切割,掺杂浓度 5 at.%且镀有 940~1 100 nm 增透膜的 Yb:CYA 晶体作为激光晶体。为实现高功率克尔透镜锁模,将一片 2 mm 厚的石英片作为克尔介质插入腔内,这样实验中激光增益介质 Yb:CYA 将无需作为克尔介质,可以实现更好的高功率下较大光斑尺寸的泵浦光与激光的模式匹配。实验使用的泵浦源为一台光纤耦合输出 976 nm 的 LD,纤芯直径 105 μm ,数值孔径(NA)0.15,光纤输出的泵浦光通过 1:1 的耦合系统聚焦到晶体中心,Yb:CYA 晶体中的泵浦光光斑直径大约为 105 μm 。为了消除热积累将 Yb:CYA 晶体放在通水热沉上并将水温维持在 13 $^{\circ}\text{C}$ 左右。M1 和 M2 都为曲率半径为 300 mm 的凹面镜。为了增强克尔效应石英片中的束腰半径应当尽量小,因此将石英片放置在两个曲率半径为 100 mm 的凹面镜 M3 和 M4 中心。4 个 GTI 镜在 1 035~1 055 nm 范围提供 $-2\ 900\ \text{fs}^2$ 的色散量。DM 为平面双色镜,镀有 1 020~1 120 nm 的高反膜和 800~1 000 nm 的增透膜。输出耦合镜 OC 被安装在精密平移台上,其透过率为 5%。总腔长大约为 3 m,对应的重复频率为 50 MHz。

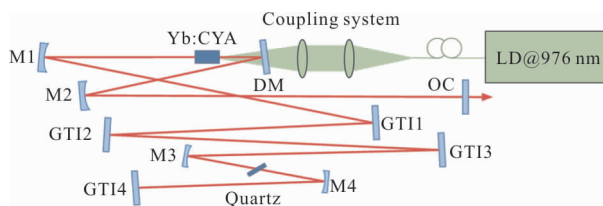


图 10 Yb:CYA 锁模激光器的实验装置图

Fig.10 Experimental setup of the mode-locked Yb:CYA laser

2.2 实验结果与分析

实验中首先将连续光输出功率优化至最大,在 18 W 泵浦功率下得到了最大输出功率 3.3 W,如图 11 所示。根据 ABCD 矩阵可得 Yb:CYA 晶体中心和石英片中的激光束腰半径分别为 88、30 μm 。通过精细调节 C4 的位置找到稳区边缘,轻推 OC 即可实现克尔透镜锁模,最大平均输出功率可达 2.52 W。笔者

测量了高功率克尔透镜锁模的输出功率曲线,如图 11 所示,在泵浦功率大于 13 W 时,克尔透镜锁模可保持稳定运转。Yb:CYA 激光器在连续光与克尔透镜锁模运转时的中心波长分别为 1 055.5、1 051.8 nm。使用商用光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6370C)测量了锁模激光的光谱曲线,通过精细调节石英片在聚焦腔中的位置可得到锁模激光光谱半高全宽最宽至 18.2 nm,如图 12(a)所示,通过傅里叶变换可支持 64 fs 的傅里叶变换极限脉冲。使用商用自相关仪

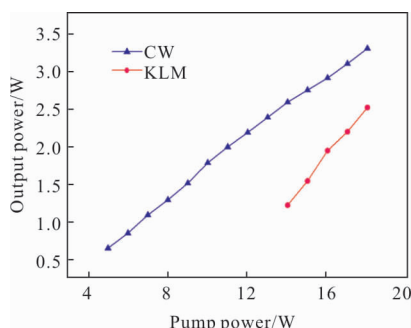


图 11 Yb:CYA 激光器的连续光与锁模输出特性

Fig.11 Output performance of the continuous wave(CW) and mode-locking of Yb:CYA laser

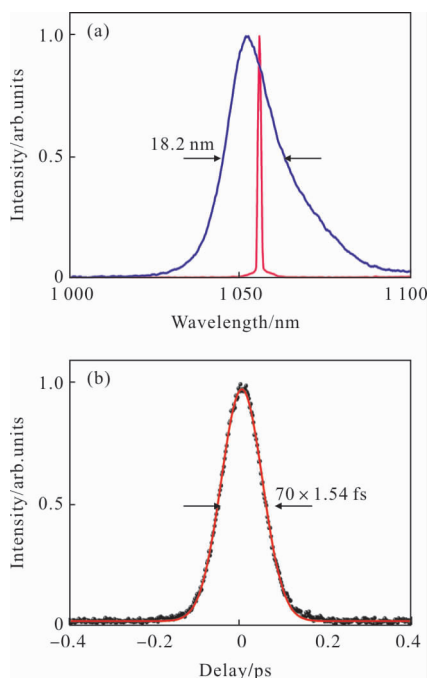


图 12 KLM Yb:CYA 激光器的 CW 与锁模光谱(a)锁模脉冲的强度自相关曲线(b)

Fig.12 CW and mode-locked spectra of the KLM Yb:CYA laser (a) intensity autocorrelation curve of mode-locked pulse(b)

(FR-103MN, Femtochrome Research, Inc.) 测量锁模激光脉冲的自相关曲线,如图 12(b)所示。从图中可以看出激光脉冲的自相关曲线半高全宽为 108 fs,用双曲正割拟合,脉冲宽度为 70 fs,接近于傅里叶变换极限。在自相关仪中 50 ps 时间延迟内只观察到自相关曲线峰值单个峰值即为单脉冲运转。另外使用 500 MHz 带宽的示波器测得的脉冲序列如图 13 所示, 模脉冲序列中没有明显的调 Q 调制。

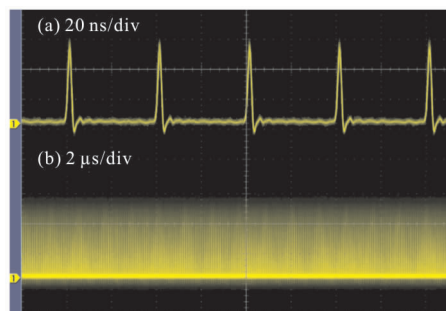


图 13 在(a) 20 ns/div 和(b) 2 μs/div 时间尺度下的脉冲序列

Fig.13 Pulse train in the time scales of (a) 20 ns/div and (b) 2 μs/div

3 结论

为了实现高功率短脉冲的激光输出,文中利用 LD 泵浦 Yb:LYSO 晶体,合理设计腔型通过 SESAM 锁模获得了高功率高效率的飞秒激光器,分别在 1 035、1042 nm 实现了 3 W 的稳定锁模运转,相应的脉冲宽度分别为 351、287 fs,斜效率分别为 88.2%和 89.7%;其次设计了将激光增益介质与克尔介质分开的双聚焦谐振腔结构,可克服传统克尔透镜锁模中激光晶体同时作为增益介质和克尔介质的困难,通过 LD 泵浦 Yb:CYA 晶体得到了高功率克尔透镜锁模飞秒激光器,相应的为脉冲宽度 70 fs,平均功率为 2.52 W。上述结果表明 Yb:LYSO 和 Yb:CYA 晶体在产生瓦级功率亚百飞秒脉冲方面拥有巨大的潜力与应用价值。

参考文献:

[1] Brons J, Pervak V, Fedulova E, et al. Energy scaling of Kerr-lens mode-locked thin-disk oscillators [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6442-6445.
 [2] Brunner F, Südmeyer T, Innerhofer E, et al. 240 fs

- pulses with 22 W average power from a mode-locked thin-disk Yb:KY(WO₄)₂ laser[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13):1162-1164.
- [3] Kränkel C, Saraceno C J, Baer C R E, et al. Continuous-wave and modelocked Yb:YCOB thin disk laser: first demonstration and future prospects[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 19201-19208.
- [4] Baer C R E, Kränkel C, Saraceno C J, et al. Efficient femtosecond Yb: Lu₂O₃ thin disk laser with an average power of 141 W [C]//6th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE 2010). Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [5] Saraceno C J, Heckl O H, Baer C R E, et al. Sub-100 femtosecond pulses from a SESAM modelocked thin disk laser[J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(3): 559-562.
- [6] Xu J, Wentsch K S, Zheng L, et al. Passively mode-locked Yb³⁺:Sc₂SiO₅ thin-disk laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4750-4752.
- [7] Machinet G, Sevillano P, Guichard F, et al. High-brightness fiber laser-pumped 68 fs-2.3 W Kerr-lens mode-locked Yb:CaF₂ oscillator [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4008-4010.
- [8] Sévillano P, Georges P, Druon F, et al. 32 fs Kerr-lens mode-locked Yb:CaGdAlO₄ oscillator optically pumped by a bright fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 6001-6004.
- [9] Zhao H, Major A. Powerful 67 fs Kerr-lens mode-locked prismless Yb:KGW oscillator. [J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 31846-31851.
- [10] Tian W, Peng Y, Zhang Z, et al. Diode-pumped power scalable Kerr-lens mode-locked Yb:CYA laser [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(2): 127.
- [11] Tian W, Zhu J, Peng Y, et al. High power sub 100 fs Kerr-lens mode-locked Yb:YSO laser pumped by single-mode fiber laser. [J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5962.
- [12] Li W, Xu S, Pan H, et al. Efficient tunable diode-pumped Yb:LYSO laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(15): 6681-6686.
- [13] Liu J, Yang J M, Wang W W, et al. Passive picosecond and femtosecond mode-locking laser action of Yb³⁺:LuYSiO₅[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(4): 659-662.
- [14] Yang Q, Wang Y G, Liu D H, et al. Dual-wavelength mode-locked Yb:LuYSiO₅ laser with a double-walled carbon nanotube saturable absorber [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(2): 135-140.
- [15] Tian W, Wang Z, Wei L, et al. Diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:LYSO laser with 61fs pulse duration.[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19040.
- [16] Tan W D. Femtosecond and continuous-wave laser performance of a diode-pumped Yb³⁺:CaYAlO₄ laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(2): 259-261.
- [17] Pirzio F, Cafiso S D, Kemnitzer M, et al. Sub-50 fs widely tunable Yb:CaYAlO₄ laser pumped by 400 mW single-mode fiber-coupled laser diode [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 9790-9795.
- [18] Zhu J, Xu J, Wang J, et al. Generation of 33 fs pulses directly from a Kerr-lens mode-locked Yb:CaYAlO₄ laser[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(6): 1-2.
- [19] Ma J, Huang H, Ning K, et al. Generation of 30 fs pulses from a diode-pumped graphene mode-locked Yb:CaYAlO₄ laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 41(5): 890-893.