

引用格式: MA Junyi, ZHAO Guodong, SHAO Xiaodong, et al. GHz Watt-scale All Solid State Kerr Lens Mode-locked Yb:CYA Femtosecond Laser (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):1014006

马骏逸,赵国栋,邵晓东,等. GHz 瓦级全固态克尔透镜锁模 Yb:CYA 飞秒激光器(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(10):1014006

# GHz 瓦级全固态克尔透镜锁模 Yb:CYA 飞秒激光器(特邀)

马骏逸<sup>1,2</sup>, 赵国栋<sup>1,2</sup>, 邵晓东<sup>1</sup>, 韩海年<sup>1,3</sup>, 魏志义<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院物理研究所 光物理重点实验室, 北京 100190)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808)

**摘要:**掺镱氟酸钪钙(Yb:CaYAlO<sub>4</sub>, 简称 Yb:CYA)晶体具有生长容易、增益曲线宽广平坦以及比热容高和导热性好等优点,是产生飞秒超短脉冲的优异介质晶体。本文介绍了一种基于 Yb:CYA 晶体的全固态克尔透镜锁模 GHz 飞秒振荡器,采用功率为 8 W 的 980 nm 光纤激光作为泵浦源,腔型为四镜环形腔结构, Yb:CYA 晶体厚度为 3 mm。该振荡器能够产生中心波长 1 051 nm、平均输出功率 1.7 W 的 GHz 飞秒脉冲,脉冲宽度为 207 fs。基于 Yb:CYA 晶体的振荡器实现了 GHz 重频瓦级飞秒脉冲输出,为进一步基于此振荡器实现高重频飞秒光学频率梳打下了坚实基础。

**关键词:** Yb:CYA; GHz 重复频率; 全固态飞秒振荡器; 克尔透镜锁模; 光学频率梳

中图分类号: O43

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225110.1014006

## 0 引言

随着基于飞秒激光的光频梳技术的出现,高重频锁模飞秒振荡器变得越来越重要,光学频率梳也被应用在各个领域,例如将光学频率梳应用于天文光谱仪的校准,即天文光梳,用来寻找系外行星、宇宙学研究和确定基本常数的变化。天文光梳要求重复频率在 15~30 GHz 以上,使得频率梳齿能够被光谱仪所分辨<sup>[1]</sup>。高重复频率的全固态飞秒激光器固有噪声低、腔长灵活可调,是飞秒光学频率梳的良好光源。掺镱激光增益介质能级结构简单、量子效率高、存在高功率低成本泵源,支持 100 fs 以下的脉宽和高平均功率的输出,这些优势与克尔透镜锁模激光器结合非常适合光频梳应用。在过去的几年里,许多晶体已经有了非常亮眼的表现,其中包括 KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(KYW)<sup>[2]</sup>、KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(KGW)<sup>[3]</sup>以及 CaGdAlO<sub>4</sub>(CALGO)<sup>[4-7]</sup>。但是在大多数基于上述材料的激光源中,使用克尔透镜锁模(Kerr Lens Mode Locking, KLM)的飞秒激光器往往无法同时兼顾 1 GHz 以上的重复频率、100 fs 以下的脉冲宽度和超过 1 W 的平均输出功率。

在过去的二十年中,镱掺杂材料由于其大的发射带宽、高的量子效率和优异的热性能而受到越来越多的关注<sup>[8]</sup>。特别是 CALGO 激光晶体的开发<sup>[9]</sup>,因其出色的光谱性能和热性能,使得该晶体与半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorption Mirror, SESAM)锁模一起使用,表现出了高重频、高功率下的最短脉冲持续时间<sup>[4-7]</sup>。

采用传统 Czochralski 法生长的 Yb:CYA 作为 Yb 掺杂铝酸盐类增益介质,和 Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> 同属于四方晶系的 ABCO 化合物,其中 A=Sr, Ca; B=稀土元素, C=Ga, Al<sup>[10]</sup>, 其特性也类似于 CALGO, 包括宽吸收光谱和荧光光谱、相对较高的比热容和导热性。由于其更容易生长和制造,因此成为 CALGO 晶体的绝佳替代材料。基于 Yb:CYA 晶体实现的飞秒激光脉冲于 2011 年被报道<sup>[11-12]</sup>, 产生了 740 mW 的平均功率和

基金项目:中国科学院战略重点研究计划(Nos.XDA1502040404, XDB21010404)

第一作者:马骏逸(1997—),女,博士研究生,主要研究方向为超快激光技术和光学频率梳。Email: jyma@iphy.ac.cn

导师(通讯作者):韩海年(1974—),女,副研究员,博士,主要研究方向为超快激光技术和光学频率梳。Email: hnhan@iphy.ac.cn

收稿日期:2022-07-01;录用日期:2022-09-30

<http://www.photon.ac.cn>

156 fs的脉冲宽度的激光脉冲;此外,由于介质的无序结构导致发射光谱宽而平坦,2018年,江苏师范大学马杰等报道的Yb:CYA振荡器的输出脉冲的脉宽短至21 fs<sup>[13]</sup>;而采用Yb:CYA晶体实现的最高输出功率和最高峰值功率由西安电子科技大学田文龙等实现<sup>[8,14]</sup>。Yb:CYA光学频率梳在2016年首次亮相,展示了1  $\mu\text{m}$ 波段第一个克尔透镜锁模的固态光学频率梳<sup>[15]</sup>。2019年,本课题组首次实现了瓦级固态Yb:CYA飞秒激光频率梳的载波包络相移频率和重复频率全锁定<sup>[16]</sup>,脉冲宽度为54 fs,平均功率为1.5 W,在100 kHz分辨率带宽下,以40 dB的信噪比观察到自由运行的载波包络相位偏移频率(Carrier-envelope Offset,  $f_{\text{ceo}}$ ),锁定后 $f_{\text{ceo}}$ 的剩余相位抖动仅为370 mrad,在锁定时长3 h内、计数门时间为1 s时, $f_{\text{ceo}}$ 长期频率漂移标准差仅为0.8 mHz。

本文搭建了光纤激光泵浦的基于Yb:CYA晶体的1 GHz飞秒激光振荡器,采用克尔透镜锁模技术,能够产生以1 051 nm波长为中心、最大输出功率1.7 W的锁模脉冲输出,对应的傅立叶变换极限脉宽约为207 fs,这是Yb:CYA振荡器首次实现的GHz飞秒脉冲输出,为寻求高重频、高平均功率的紧凑且坚固的飞秒光梳提供了一种有吸引力的光源方案。

## 1 实验装置

作为Yb离子掺杂的铝酸盐晶体,Yb:CYA晶体有着生长方便、热容高等优势,较高的热容意味着晶体有更高的损坏阈值,有望实现更高的输出功率。图1是Yb:CYA晶体的实物图,Yb:CYA晶体由99.999%纯度的 $\text{Yb}_2\text{O}_3$ , $\text{CaCO}_3$ , $\text{Y}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等前驱物在氮气的环境下由Czochralski法所生长。

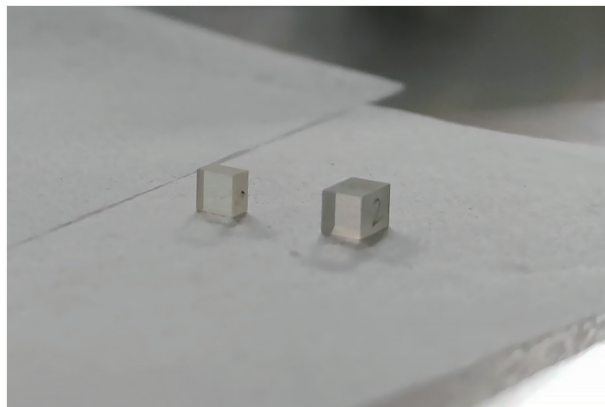
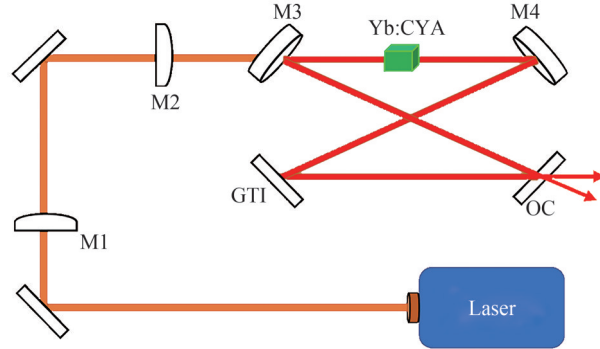


图1 8 at. %掺杂的Yb:CYA晶体  
Fig.1 8 at. % doped Yb:CYA crystal

到目前为止,已经发展出多种方法来生成高重复频率的脉冲,包括KLM、SESAM、电光调制(Electro-Optic Modulator, EOM)光频梳、微型谐振腔和腔外倍频技术等,其中克尔透镜锁模因为它无源锁模的特殊机制,有着结构简单、响应速度快、自启动和自维持等优势,因此具有低相位噪声的宽带发射光谱的克尔透镜锁模激光器在包括光频梳生成等许多领域都是有吸引力的光源。一般来说,克尔效应很大程度上取决于克尔介质内的模式半径,因此,本文中高重频克尔透镜锁模飞秒Yb:CYA振荡器的设计主要基于小腔模束腰、紧聚焦泵浦和低透过率输出耦合镜(Output Coupler, OC)的原则,用于在晶体中获得所需的高强度克尔透镜效应,以此来支持克尔透镜锁模,实验装置示意如图2。为了实现泵浦光束和谐振腔内激光模式的最佳匹配,所选择的泵浦激光器是法国Azur Laser System(ALS)公司的多模光纤泵源,中心波长为980 nm,最大输出功率为9.2 W,与常用的激光二极管(Laser Diode, LD)泵源相比光束质量更优,且强度噪声更低,适合发展低噪声全固态光学频率梳。采用的腔体是一个蝴蝶结型环形谐振腔<sup>[17]</sup>,与线性腔型相比,环形腔的优势主要体现在以下几个方面:首先,环形腔两个方向的激光不对称性更大,因此在更高的泵浦功率下,环形腔不容易产生额外的脉冲;其次,后续元器件的回射光是以与单向激光相反的方向注入晶体,因此环形腔中的锁模对光束回射回激光腔相对不敏感,而线性腔中激光束的任何轻微回射通常都会破坏锁模,在这种情况下,必须在输出耦合器之后插入光隔离器;环形腔的另一个好处是减少了腔中的色散,因为脉冲每次往

返仅穿过增益介质一次,在不影响输出功率的情况下,在环形腔中的色散本质上比线性腔减少了两倍;最重要的是,根据重复频率与谐振腔腔长的反比关系,相同尺寸的激光器,环形腔更有助于提高重复频率。因此,环形腔小巧的结构及其独特的优势被广泛应用于高重复频率的飞秒脉冲激光器,然而,也正是出于这种原因,腔内色散补偿技术的选择性受到了一定的限制。



Laser: multi-longitudinal mode narrow linewidth fiber laser; M1: collimating lens; M2: condensing lens; M3, M4: concave mirrors with ROC of 50 mm; GTI: Gires-Tournois interferometer mirrors with  $-1350 \text{ fs}^2$  per bounce; OC: output coupler with transmittance of 1.6%

图2 GHz Yb:CfA 激光器实验装置

Fig.2 Experimental setup of the GHz-Yb:CfA laser

泵浦光通过M1透镜准直后,再通过M2透镜聚焦到块状Yb:CfA晶体上,两个凹面镜M3和M4的曲率半径(Radius of Curvature,ROC)为50 mm,其中一个安装在一维平移台上用于启动锁模。Gires-Tournois干涉仪镜(Gires-Tournois-Interferometer,GTI)和输出耦合镜是平面镜。该Yb:CfA晶体大小为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,沿a方向切割,掺杂浓度为8 at. %。泵浦光正入射晶体,为了减少热量累积使晶体保持恒定的温度,增益晶体被包裹在铜铂中,并通入循环水对晶体进行冷却。振荡器两臂的长度和两凹面镜间的距离对锁模状态影响很大,通过优化锁模状态,最终确定的参数为:M3至OC为80.5 mm,M4至GTI为61 mm,GTI至OC为88 mm,M3至M4在50.5 mm到60.5 mm之间调节,谐振腔的总长度为29 cm,在此配置中得到的对应重复频率为1 GHz。激光器产生大约1 W的输出功率(单向),经过仔细对准后,调节凹面镜M4,锁模将自动启动。

Yb:CfA晶体发射光谱覆盖950~1100 nm,如果腔内的色散补偿不合理,大量的光谱成分无法同时起振,那么也无法输出较宽的光谱及较窄的脉冲。迄今为止,绝大多数掺镱晶体被动锁模飞秒激光腔都是在大的负群速度色散(Group Velocity Dispersion, GVD)范围内工作。早期的飞秒激光振荡器均采用棱镜对腔内色散进行优化设计,其基本思想是在空间上将不同的光谱成分展开,使之经历不同的光程后,再在空间上合束,从而补偿不同光谱成分的群速度延时,其所提供的色散量由两棱镜的材料以及棱镜间的间距所决定。近年来,将色散材料与镜片集成化的啁啾镜和GTI镜由于其结构简单、使用方便等优点得到越来越多的使用。设计中,色散补偿通过腔内平凹GTI镜M4和平面GTI镜(均由Layertec提供)组合来实现的。M4在1040 nm附近波段反射率大于99.9%并提供单次反射 $-550 \text{ fs}^2 \pm 50 \text{ fs}^2$ 的负色散。GTI在1000~1160 nm的波段反射率大于99.9%并提供约为 $-800 \text{ fs}^2$ 的负色散。OC为无色散宽带全反镜,在透射带宽内的二阶色散为0。结合腔内Yb:CfA晶体及色散补偿镜考虑,所设计的谐振腔在1045 nm附近的单程往返群延迟色散为(Group Delay Dispersion, GDD) $-1350 \text{ fs}^2$ ,根据晶体的折射率以及晶体厚度等信息,计算得到Yb:CfA晶体在1  $\mu\text{m}$ 附近提供 $\sim 85 \text{ fs}^2/\text{mm}$ 的材料正群速度色散<sup>[18]</sup>。

## 2 实验结果

为了实现稳定的锁模,首先在连续波(Continuous Wave,CW)模式下优化激光功率,振荡器在连续激光输出状态下,环形腔中的激光沿两个相反方向同时输出,然后扫描凹面镜M4的位置,以寻找激光光谱分叉和激光功率不稳定的区域,当腔内自相位调制与自聚焦效应达到产生克尔透镜锁模的条件时,即可使腔内各个纵模模式同相起振,实现锁模输出并观察到光谱展宽。此时,一个方向的锁模序列会自动抑制另一个

方向的模式运转,最终,腔内只有一个方向的稳定锁模脉冲输出。

首先使用1.6%的输出耦合镜实现锁模,当对直流操作进行优化时,激光器中1 050 nm附近提供1.4 W的最大输出功率,激光器稳区跨越3 mm以上。随着M4向晶体进行小而快速的平移,最终实现锁模,当振荡器锁模后,即使没有注意将激光器与环境隔离,激光器的脉冲操作也是稳定的。

采用市售的(Menlo systems)雪崩光电二极管(Avalanche Photon Diode, APD)接收锁模后的脉冲信号。图3(a)是稳定锁模时示波器(RTM3004, Rohde & Schwarz)所测得的脉冲序列,示波器带宽为1 GHz,从图中可以看出振荡器处于十分稳定的连续锁模状态,完全没有调Q包络出现。采用光谱仪(AQ6370C, YOKOGAWA)测量锁模脉冲的光谱,光谱范围为1 037 nm至1 066 nm,锁模稳定时观测到的光谱宽度为7.1 nm,峰值为1 051.3 nm,如图3(b)。为了进一步验证锁模状态的稳定性,采用分辨率为100 kHz的频谱仪(E4402B, Agilent Inc)所测得的输出光谱频谱信号如图3(c),重复频率为1.03 GHz,信噪比为50 dB,且不存在调制频率,这表明KLM运行稳定。在最佳KLM操作下,使用一台商用的功率计(LP-3A, 北京物科光电)测量了在稳定锁模的条件下输出脉冲的功率稳定性曲线,如图3(d),在40 min内功率抖动在0.004%以下。图3(e)中黑色虚线为得到的典型脉宽测量自相关曲线,由扫描强度自相关仪(pulseCheck, APE)测得的,结合自相关轨迹和高速实时示波轨迹,确认谐振腔是单脉冲运转。根据sech<sup>2</sup>拟合结果,能够脉冲持续时间约为207 fs的脉冲。

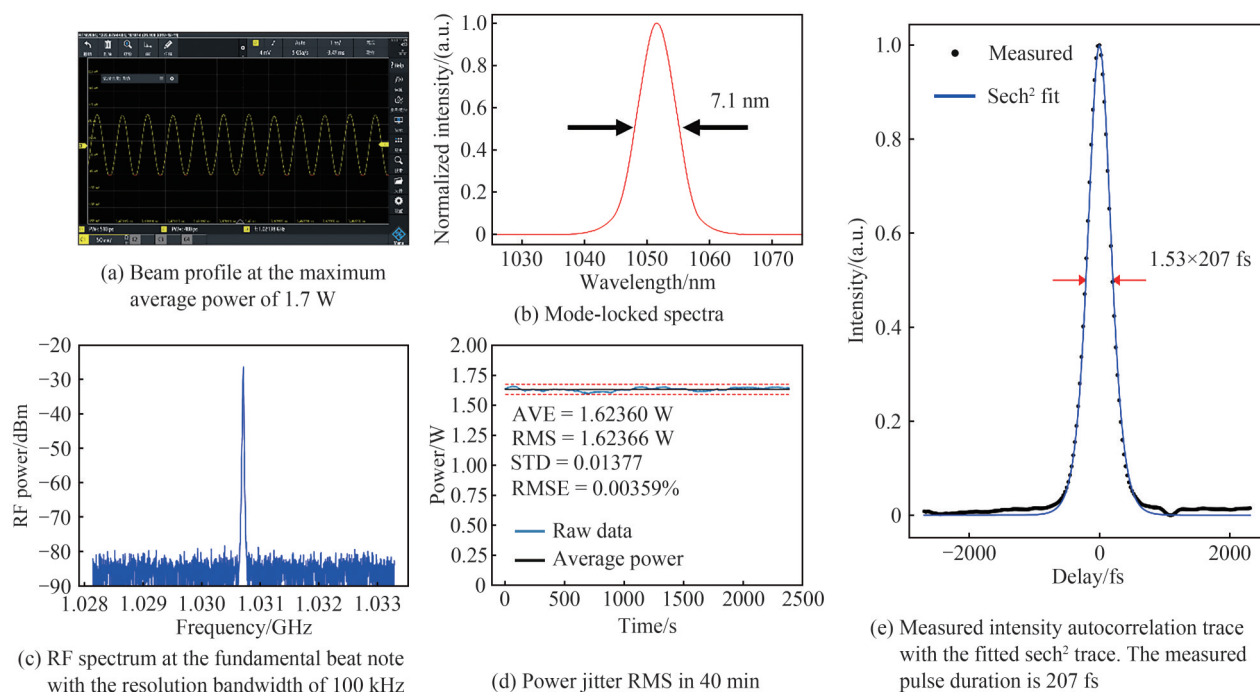


图3 使用1.6%输出耦合镜得到的锁模结果

Fig.3 Pulse characterization results of the KLM Yb:C:YA laser with 1.6% OC

在腔内峰值功率足够的前提下,将输出耦合镜更换为0.8% OC,观察到了更宽的光谱。这种情况下,CW的最大功率下降至814 mW,锁模输出功率为857 mW。中心波长不变,半峰全宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)为10 nm,同样假设输出脉冲为双曲正割型,计算可得该光谱对应的傅里叶变换时域脉冲波形如图4(b),其FWHM约为118 fs。当使用不同透过率的输出耦合镜时,腔内功率的改变会引起光谱宽度的改变,又因为GTI镜的覆盖带宽较宽,因此,可以通过改变OC和选用不同GTI配合调节腔内色散,来获得更宽的光谱。

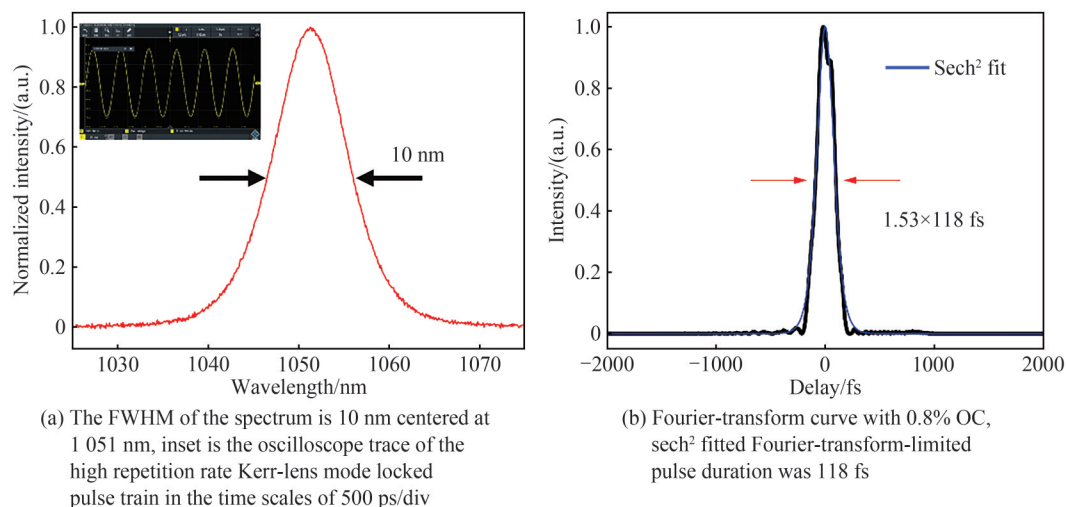


图4 使用0.8%OC测量的激光输出的光谱及对应极限脉宽

Fig.4 Optical spectrum and corresponding Fourier-transform curve with 0.8% OC

### 3 结论

通过采用 Yb:CYA 晶体作为增益介质,搭建了一套蝴蝶结型腔的光纤激光泵浦、1.03 GHz 重复频率的克尔透镜锁模振荡器。光谱宽度在 1 051 nm 附近为 7.1 nm,1.7 W 的输出功率允许在微结构光子晶体光纤中直接产生超连续谱,而无需放大脉冲。相较于其它千兆赫克尔透镜锁模的全固态飞秒激光振荡器,本文中的 Yb:CYA 振荡器将输出功率从毫瓦量级提升至瓦特量级,为后续测量和锁定该 1 GHz 飞秒脉冲的载波包络相移信号,建成梳齿频率绝对稳定的高重频光梳系统,应用于光梳测频、光梳测距,双光梳光谱学等研究领域提供了坚实的实验基础。

#### 参考文献

- [1] HERR T, MCCRACKEN R A. Astrocombs: recent advances[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(23): 1890-1893.
- [2] ENDO M, OZAWA A, KOBAYASHI Y. Kerr-lens mode-locked Yb: KYW laser at 4.6-GHz repetition rate[J]. Optics Express, 2012, 20(11): 12191-12197.
- [3] ZHENG Li, TIAN Wenlong, LIU Han, et al. 2-GHz watt-level Kerr-lens mode-locked Yb: KGW laser[J]. Optics Express, 2021, 29(9): 12950-12957.
- [4] KLENNER A, GOLLING M, KELLER U. High peak power gigahertz Yb: CALGO laser[J]. Optics Express, 2014, 22(10): 11884-11891.
- [5] KLENNER A, KELLER U. All-optical Q-switching limiter for high-power gigahertz modelocked diode-pumped solid-state lasers[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8532-8544.
- [6] MAYER A S, PHILLIPS C R, KELLER U. Watt-level 10-gigahertz solid-state laser enabled by self-defocusing nonlinearities in an aperiodically poled crystal[J]. Nature communications, 2017, 8(1): 1-8.
- [7] KRÜGER L M, MAYER A S, OKAWACHI Y, et al. Performance scaling of a 10-GHz solid-state laser enabling self-referenced CEO frequency detection without amplification[J]. Optics Express, 2020, 28(9): 12755-12770.
- [8] TIAN Wenlong, PENG Yingnan, ZHANG Ziyue, et al. Diode-pumped power scalable Kerr-lens mode-locked Yb: CYA laser[J]. Photonics Research, 2018, 6(2): 127-131.
- [9] PETIT J, GOLDNER P, VIANA B. Laser emission with low quantum defect in Yb: CaGdAlO<sub>4</sub>[J]. Optics Letters, 2005, 30(11): 1345-1347.
- [10] LI Dongzhen, XU Xiaodong, ZHU Haomiao, et al. Characterization of laser crystal Yb: CaYAlO<sub>4</sub>[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(7): 1650-1654.
- [11] TAN Wenda, TANG Dingyuan, XU Xiaodong, et al. Femtosecond and continuous-wave laser performance of a diode-pumped Yb<sup>3+</sup>: CaYAlO<sub>4</sub> laser[J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 259-261.
- [12] TAN Wenda, TANG Dingyuan, XU Xiaodong, et al. Room temperature diode-pumped Yb: CaYAlO<sub>4</sub> laser with near quantum limit slope efficiency[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(3): 193-196.
- [13] MA Jie, XU Xiaodong, SHEN Deyuan, et al. 21-fs Kerr-lens mode-locked Yb: CaYAlO<sub>4</sub> laser [C]. CLEO: QELS\_Fundamental Science, Optica Publishing Group, 2018: JTh2A. 158.

- [14] TIAN Wenlong, YU Chen, ZHU Jiangfeng, et al. Diode-pumped high-power sub-100 fs Kerr-lens mode-locked Yb:CaYAlO<sub>4</sub> laser with 1.85 MW peak power[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21448-21454.
- [15] YU Zijiao, HAN Hainian, XIE Yang, et al. CEO stabilized frequency comb from a 1- $\mu$ m Kerr-lens mode-locked bulk Yb:CYA laser[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 3103-3111.
- [16] ZHANG Ziyue, HAN Hainian, TIAN Wenlong, et al. A fully stabilized low-phase-noise Kerr-lens mode-locked Yb:CYA laser frequency comb with an average power of 1.5 W[J]. Applied Physics B, 2020, 126(8): 1-9.
- [17] ZHENG Li, WANG Huibo, TIAN Wenlong, et al. LD-pumped high-repetition-rate all-solid-state femtosecond lasers (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(12): 20201069.
- [18] LOIKO P, BECKER P, BOHATÝ L, et al. Sellmeier equations, group velocity dispersion, and thermo-optic dispersion formulas for CaLnAlO<sub>4</sub> (Ln= Y, Gd) laser host crystals[J]. Optics Letters, 2017, 42(12): 2275-2278.

## GHz Watt-scale All Solid State Kerr Lens Mode-locked Yb:CYA Femtosecond Laser (Invited)

MA Junyi<sup>1,2</sup>, ZHAO Guodong<sup>1,2</sup>, SHAO Xiaodong<sup>1</sup>, HAN Hainian<sup>1,3</sup>, WEI Zhiyi<sup>1,3</sup>

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

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan, Guangdong 523808, China)

**Abstract:** Great emphasis has been placed on the development of GHz femtosecond lasers for the Yb-doped All-Solid-State Laser (ASSL) that has important application values in many fields such as precision measurement. Compared to general femtosecond oscillators with repetition frequencies in the tens to hundreds of megahertz, GHz femtosecond pulse has been demonstrated to have larger spacing between adjacent longitudinal modes and higher single longitudinal mode power. This GHz repetition frequency femtosecond oscillator is realized by passive mode-locking techniques, including Semiconductor Saturable Absorption Mirror (SESAM) and Kerr Lens Mode-locking (KLM). The latter has the following advantages: simplicity, very fast response, self-starting and self-sustaining. Ytterbium-doped gadolinium calcium chlorate (Yb:CaYAlO<sub>4</sub>, referred to as Yb:CYA) crystal has the advantages of easy growth, broad and flat gain curve, high specific heat capacity, good thermal conductivity, etc. It is an excellent dielectric crystal for generating femtosecond ultrashort pulses.

Femtosecond laser pulses based on Yb:CYA crystals were first reported in 2011. In 2018, MA Jie et al. of Jiangsu Normal University reported that the shortest pulse width of Yb:CYA oscillators was 21 fs with the help of two SF10 prisms, while the highest output and peak power achieved by Yb:CYA crystals was experimentally realized by TIAN Wenlong et al. from Xidian University. The Yb:CYA optical frequency comb debuted in 2016, demonstrating the first Kerr lens mode-locked solid-state optical frequency comb in the 1  $\mu$ m band. In 2019, the author's research group achieved for the first time that a watt-scale solid-state Yb:CYA femtosecond laser frequency comb is fully locked to the carrier envelope phase shift frequency and repetition frequency, with a pulse width of 54 fs and an average power of 1.5 W. The free-running carrier-envelope offset ( $f_{ceo}$ ) was observed with a signal-to-noise ratio of 40 dB at 100 kHz resolution bandwidth, and the residual phase jitter of the  $f_{ceo}$  after locking was only 370 mrad. When the duration is 3 hours and the counting gate time is 1 s, the standard deviation of  $f_{ceo}$  long-term frequency drift is only 0.8 mHz.

In this paper, an all-solid-state Kerr lens mode-locked GHz femtosecond oscillator based on Yb:CYA crystal is introduced. A 980 nm fiber laser with a power of 8 W is used as the pump source, and the cavity type is a four-mirror ring cavity structure. In our experience the ring cavity has the advantages of stable mode locking, relatively insensitive to optical feedback, reducing the dispersion in the cavity and high repetition frequency compared with the linear cavity configuration. The transmission of the output coupler is 1.6%. The 3 mm Yb:CYA crystal is wrapped with indium foil and mounted in a copper block that is cooled by using a water cooler with temperature feedback to maintain a constant 13°C temperature, and the sample is antireflection-coated for both the pump and laser wavelengths from 970 nm to 1 200 nm. The initiation of the mode locking is observed by a fast oscilloscope, and the oscillator is capable of

generating GHz femtosecond pulses with a center wavelength of 1 051 nm and an average output power of 1.7 W with a pulse duration of 207 fs. The Radio Frequency (RF) spectra measurement shows that the fundamental frequency of the signal is about 1.02 GHz with a Resolution Bandwidth (RBW) of 100 kHz, spanning 5 MHz. The Signal-to-noise Ratios (SNR) is 50 dB, suggesting that the unidirectional KLM runs stably.

To the best of our knowledge, this is the first time that an oscillator based on Yb:CYA crystal has achieved GHz repetition frequency watt-level femtosecond pulse output, which lays a solid foundation for further realization of high repetition frequency femtosecond optical frequency combs based on this oscillator.

**Key words:** Yb: CYA; GHz repetition rate; All solid state femtosecond oscillator; Kerr lens mode locking; Optical frequency comb

**OCIS Codes:** 140.7090; 140.3580; 140.3615; 140.4050; 140.7090