

# 激光二极管泵浦的吉赫兹重复频率克尔透镜锁模 Yb:KGW 飞秒激光器

陈月航<sup>1</sup>, 郑立<sup>1</sup>, 麦海静<sup>1</sup>, 于洋<sup>2</sup>, 田文龙<sup>1\*</sup>, 朱江峰<sup>1\*\*</sup>, 魏志义<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西安电子科技大学光电工程学院, 陕西 西安 710071;

<sup>2</sup>西安电子科技大学前沿交叉研究院, 陕西 西安 710071;

<sup>3</sup>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

**摘要** 报道了激光二极管(LD)直接泵浦的吉赫兹(GHz)重复频率克尔透镜锁模 Yb:KGW 激光器。采用 976 nm 单模光纤耦合 LD 作为泵浦源,在基于 Yb:KGW 的“蝴蝶形”结构环形腔中,实现了 1 GHz 重复频率的克尔透镜锁模激光输出,平均功率为 90 mW,脉冲宽度为 265 fs。进一步利用 979.5 nm 单模光纤耦合 LD 作为泵浦源,将锁模脉冲的平均功率提高到了 151 mW,对应的脉冲宽度为 249 fs、中心波长为 1045 nm。

**关键词** 激光器; 全固态激光器; GHz 重复频率; 克尔透镜锁模

中图分类号 TN248.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220648

## 1 引言

锁模技术是获得超短脉冲的主要手段,其中克尔透镜锁模因其瞬时响应等优良特性,已经成为固体激光器中产生飞秒脉冲的最有效技术之一。基于飞秒激光器的光学频率梳<sup>[1]</sup>是精密计量学的有力工具,当光学频率梳应用于光谱学时,高重复频率的飞秒激光就变得尤为重要<sup>[2]</sup>。首先,飞秒激光的重复频率越高,就意味着其纵模频率间隔越大,更容易直接用光谱仪对每一根梳齿进行分辨,从而越容易分析和反映出目标的光谱特征;其次,纵模频率间隔越大,在相同平均功率条件下每个纵模获得的功率也就越高,在测量中能够获得越高的信噪比,当功率足够高时甚至可将单个梳齿分离出来直接作为单频连续激光器<sup>[3]</sup>使用。因此,基于高重复频率飞秒激光器的光学频率梳可应用于宽带饱和吸收光谱<sup>[4]</sup>、航空航天<sup>[5]</sup>、精确测距<sup>[6]</sup>以及人体呼吸的实时监测<sup>[7]</sup>等。在如此广阔的应用前景下,高重复频率飞秒激光器成为研究热点。

对于吉赫兹(GHz)重复频率的克尔透镜锁模激光器而言,其实现的难点主要在于克尔非线性效应很弱。因此,GHz 重复频率谐振腔的设计及增益介质和泵浦源的选择尤为重要。在线性腔中达到 GHz 的重复频率意味着腔长必须小于 150 mm,腔体非常紧凑,而环形腔腔长只需要小于 300 mm。因此,与线性腔相比,

在相同光学长度下环形腔可以获得更高的重复频率<sup>[8]</sup>,对腔长的容忍度更高。在高重复频率全固态锁模激光器中,常常使用“蝴蝶形”结构的环形腔。一般而言,GHz 重复频率环形腔中所使用的凹面镜的曲率半径通常小于 50 mm,故晶体中的激光束腰一般只有数十微米,而为了满足软孔光阑克尔透镜锁模原理的要求,泵浦光聚焦光斑必须略小于激光束腰,因此,光束质量很差的多模光纤耦合的高功率激光二极管(光纤芯径为 105  $\mu\text{m}$ )无法用作 GHz 重复频率克尔透镜锁模激光器的泵浦源。由于软孔光阑克尔透镜锁模对模式匹配的限制,通常采用单模光纤(光纤芯径约为 6.6  $\mu\text{m}$ )耦合的激光二极管(LD)作为泵浦源,其具有高亮度和高光束质量的特点,但是最大激光功率仅有 1 W 左右。因此,为了尽可能提高腔内功率,需要利用透过率较低的输出耦合镜(OC)来减小谐振腔损耗。同时,为了进一步产生足够强的克尔效应,很有必要选用非线性折射率高的增益介质。近些年来,LD 泵浦的多种掺 Yb 晶体均已实现了 GHz 克尔透镜锁模运转,2009 年,Wasylczyk 等<sup>[9]</sup>采用 500 mW 的单模 LD 泵浦 Yb:KYW 晶体,首次实现了平均功率为 115 mW 的 GHz 克尔透镜锁模运转。2012 年,Endo 等<sup>[10]</sup>同样采用 Yb:KYW 晶体获得了 4.6 GHz 锁模输出。此后,日本东京大学在 GHz 全固态克尔透镜锁模振荡器研究方面取得了一系列进展:2013 年采用 Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷获

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-04-10; 录用日期: 2022-04-25; 网络首发日期: 2022-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(11774277)、科技部重点研发计划(2017YFB0405202)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JCW-03)、西安市科技创新计划(202005YK01)

通信作者: \*wltian@xidian.edu.cn; \*\*jzhu@xidian.edu.cn

得了 6 GHz 锁模输出<sup>[11]</sup>; 2015 年在基于 Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的 15 GHz 谐振腔中实现了锁模运转<sup>[12]</sup>; 2019 年基于非常紧凑的线性腔结构, 利用 Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷实现了重复频率大于 20 GHz 的锁模运转<sup>[13]</sup>, 但是平均功率都只有数毫瓦或者数十毫瓦。2018 年, 日本东京大学 Kimura 等<sup>[14]</sup> 利用 Yb:CALGO 晶体实现了 1 GHz 重复频率的锁模运转, 并通过腔外压缩的方式获得短至 22 fs 的激光脉冲, 但是锁模功率仅有 3 mW。相比而言, Yb:KGW 晶体在 980 nm 处的主吸收峰吸收截面大 ( $1.22 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ )<sup>[15-16]</sup>, 可以获得较高的泵浦效率<sup>[17]</sup>, 在 1023 nm 处的发射截面高达  $2.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 因此具有更高的增益, 更重要的是, 其非线性折射率更高 ( $2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{W}$ )<sup>[18]</sup>, 有利于实现克尔透镜锁模, 且其 25 nm 的发射带宽足以支持亚百飞秒激光的产生<sup>[19]</sup>, 因此对 Yb:KGW 激光器的研究很有意义。2021 年, 本课题组报道了单模光纤激光器泵浦的 2 GHz Yb:KGW 克尔透镜锁模激光器<sup>[20]</sup>, 输出功率首次超过 1 W。但是, 目前利用结构稳定、成本更低的单模光纤耦合 LD 泵浦的 GHz 重复频率 Yb:KGW 激光器还未见报道。

本文采用“蝴蝶形”结构的环形腔, 在 LD 泵浦 Yb:KGW 激光器中实现了重复频率为 1 GHz 的克尔透镜锁模运转。锁模脉冲的光谱宽度为 4.2 nm, 脉冲宽度为 249 fs, 平均输出功率为 151 mW, 相应的光光转换效率为 18%, 可实现自启动和长期稳定运转。相比于价格高昂的光纤激光器泵浦的 GHz 锁模激光器, 我们在实验中采用结构稳定的单模光纤耦合 LD 作为泵浦源, 有效降低了成本, 具有更加广泛的应用范围。

## 2 实验

实验装置如图 1 所示, 其中 HWP 为半波片, P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 为输出光束。采用通光长度为 2 mm、掺杂浓度(原子数分数, 全文同)为 5% 的 Yb:KGW 晶体作为增益介质, 其通光面镀有 980~1100 nm 的增透膜, 并通过水冷散热的方式消除晶体的热积累。

泵浦源分别选用了中心波长为 976 nm 的单模光

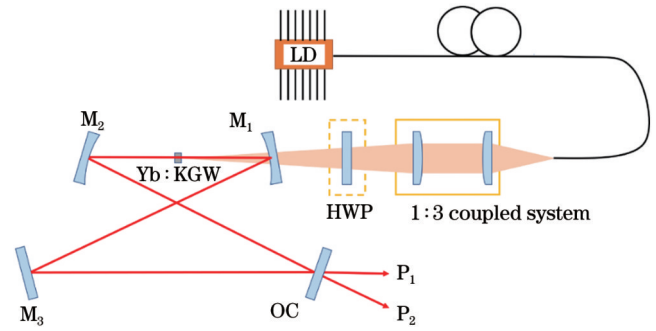


图 1 LD 泵浦的 1 GHz 重复频率 Yb:KGW 克尔透镜锁模激光器的实验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental setup for LD-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:KGW laser with 1 GHz repetition rate

纤耦合 LD(最大输出功率为 900 mW)和中心波长为 979.5 nm 的单模光纤耦合 LD, 均为蝶形封装并耦合进单模光纤的商用泵浦源。泵浦激光通过携带环形连接器/微凸抛光连接器跳线的尾纤进入自由空间, 然后通过一个扩束比为 1:3 的耦合系统聚焦到晶体中心, 晶体中心处的泵浦光聚焦光斑直径约为 22  $\mu\text{m}$ , 小于晶体中心处激光的束腰直径 40  $\mu\text{m}$ , 因此非常适用于软孔克尔透镜锁模。谐振腔为四镜环形腔结构, 总腔长为 274.5 mm, 对应的重复频率为 1.093 GHz。其中 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 均为曲率半径为 50 mm 的凹面镜, M<sub>2</sub> 和 M<sub>3</sub> 均为 GTI(Gires-Tournois interferometer)镜, 共可提供单程 1600 fs<sup>2</sup>(1035~1055 nm)的负色散。为了保证足够高的腔内峰值功率, 所用的输出耦合镜(OC)的透过率为 0.4%。

## 3 结果和讨论

实验中, 我们选用的泵浦源是中心波长为 976 nm 的单模光纤耦合 LD。首先对连续光功率进行了优化。连续光运转时为双向输出, 两路输出功率最高分别为 37.4 mW 和 32.4 mW。之后通过调节 M<sub>2</sub> 寻找锁模位置, 锁模启动时连续光变为单向运转, 平均输出功率为 90 mW, 锁模光谱的中心波长为 1045 nm, 半峰全宽( $\Delta\lambda$ )为 4.5 nm, 自相关曲线的半峰全宽为 409 fs, 拟合的脉冲宽度为 265 fs, 如图 2 所示。

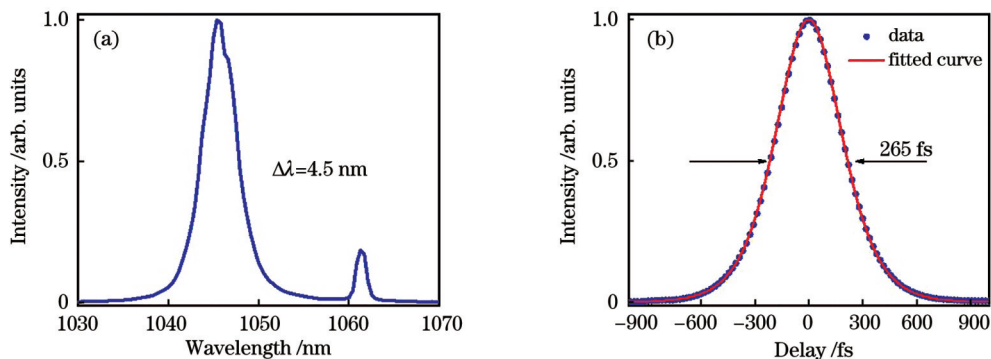


图 2 改进前的实验结果。(a) 锁模光谱图; (b) 自相关曲线

Fig. 2 Experimental results before improvement. (a) Mode-locked spectrum; (b) auto-correlation curve

由于 Yb:KGW 晶体的主吸收峰位于 980 nm 处,晶体在 980 nm 处的吸收截面更高,泵浦吸收效率更高。为了进一步提升输出功率,选择泵浦波长更接近晶体主吸收峰波长的泵浦源,即将泵浦源更换为中心波长为 979.5 nm、最大输出功率为 830 mW 的单模光纤耦合 LD。同时,由于 Yb:KGW 为各向异性晶体,沿光率体中轴偏振方向的吸收截面更大<sup>[16]</sup>,因此实验中通过半波

片来调节泵浦光的偏振以进一步提高晶体的吸收效率。最终实现单向锁模时,平均功率提高至 151 mW。此时的锁模光谱如图 3(a)所示,中心波长位于 1045 nm 附近,光谱半峰全宽为 4.2 nm,1065 nm 处产生的色散波是 GTI 镜的色散补偿带宽受限所致。使用商用自相关仪测量了相应的锁模激光脉冲的自相关曲线,如图 3(b)所示,半峰全宽为 384 fs,拟合的脉冲宽度为 249 fs。

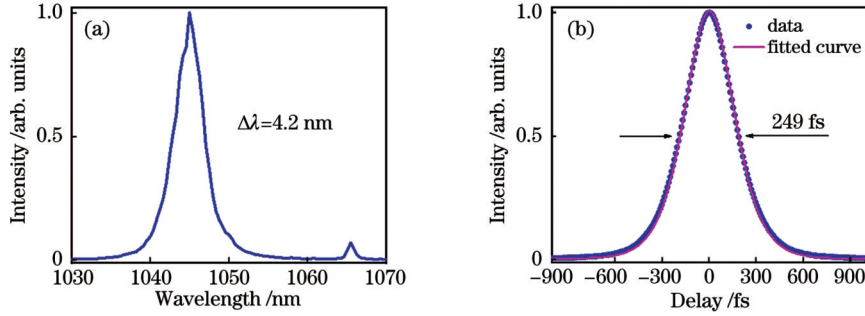


图 3 改进后的实验结果。(a)锁模光谱图;(b)自相关曲线

Fig. 3 Experimental results after improvement. (a) Mode-locked spectrum; (b) auto-correlation curve

此外,我们进一步对腔内色散补偿进行了实验分析。分别利用高反镜(HR)、色散补偿量为 $-300 \text{ fs}^2$ 的 GTI 镜、色散补偿量为 $-550 \text{ fs}^2$ 的 GTI 镜、色散补偿量为 $-800 \text{ fs}^2$ 的 GTI 镜以及色散补偿量为 $-1000 \text{ fs}^2$ 的 GTI 镜作为  $M_3$  进行了测试。结果显示,使用 HR 或色散补偿量为 $-300 \text{ fs}^2$ 的 GTI 时不能启动锁模,使用色散补偿量为 $-550 \text{ fs}^2$ 的 GTI 时可以启动锁模但是锁模不稳定,使用色散补偿量为 $-1000 \text{ fs}^2$ 的 GTI 时容易启动锁模但是锁模很不稳定,只有使用色散补偿量为 $-800 \text{ fs}^2$ 的 GTI 时可以实现长期稳定锁模。在使用 HR 或色散补偿量为 $-300 \text{ fs}^2$ 的 GTI 时,由于色散补偿不足,锁模无法启动。另外,观察色散补偿量为 $-550 \text{ fs}^2$ 的 GTI 和色散补偿量为 $-1000 \text{ fs}^2$ 的 GTI 的色散曲线,发现其主要的色散补偿范围分别位于 1050~1080 nm 和 1055~1075 nm,与锁模波段不匹配。色散补偿量为 $-800 \text{ fs}^2$ 的 GTI 的主要色散补偿波段为 1030~1060 nm,与锁模波段重合且能够提供足够的色散补偿,因此可以实现稳定锁模,且在实验室环境下,仅通过增加泵浦功率即可实现锁模自启动,并能

够长期稳定运行。图 4(a)为锁模稳定运转时的频谱,基频信号在 1.029 GHz 处的信噪比为 62 dB。由于所用高速光电探头的带宽为 350 MHz,因此基频光的信号强度偏低,同时谐波强度较小,因此未进行相关数据的采集。锁模功率长期稳定性的测量结果如图 4(b)所示,平均功率为 151 mW,24 h 内的功率抖动均方根(RMS)为 0.76%。其中,环境振动等因素变化使得激光器脱离了稳定锁模的状态,因此在 3 h 附近以及 6 h 附近出现了功率抖动,但均能在短时间内重新自启动。相比于此前的 LD 泵浦的高重复频率激光器<sup>[10-12]</sup>,所设计的激光器在输出功率提升方面获得了很大的进步。上述实验<sup>[10-12]</sup>为了在更高重复频率下获得足够高的峰值功率以增强克尔效应,直接将透过率低于 0.05% 的啁啾镜作为输出镜,输出功率均在十毫瓦或数十毫瓦量级,而我们选用了比 Yb:KYW ( $8.7 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ )、Yb: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $8.6 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ ) 以及 Yb: Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $13 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ ) 晶体具有更高非线性折射率的 Yb:KGW 晶体 ( $20 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ ) 作为增益介质,且选用透过率为 0.4% 的 OC,因此能够获得高达 151 mW 的锁模功率

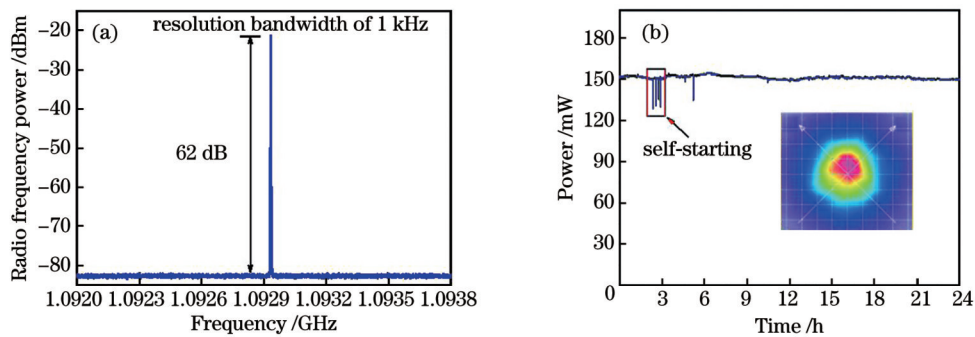


图 4 实验结果。(a)稳定锁模时的射频频谱图;(b)长期功率稳定性测量结果,插图为锁模光斑

Fig. 4 Experimental results. (a) Radio frequency spectrum during stable mode-locking; (b) long-term power stability measurement result with mode-locked spot shown in inset



输出。相较于重复频率相当的激光器<sup>[9]</sup>,所设计的激光器在 500 mW 的泵浦功率下采用透过率为 0.5% 的 OC 获得了 115 mW 的锁模功率输出,我们采用泵浦功率 (900 mW) 更高的泵浦源进一步提高了锁模输出功率。

## 4 结 论

设计了单模光纤耦合 LD 泵浦的 GHz 重复频率克尔透镜锁模 Yb:KGW 飞秒激光器,输出功率达到 151 mW,且可以实现长期稳定运转。采用高功率多模 LD 泵浦有望实现瓦级高功率的锁模输出,但是急需解决腔模匹配问题以及光束质量问题。未来将在多模 LD 泵浦的高功率 GHz 克尔透镜锁模激光器<sup>[21]</sup>方面进行探索,相信在不久的将来,直接由多模光纤耦合 LD 泵浦的高功率 GHz 克尔透镜锁模激光器将成为可能。

## 参 考 文 献

- [1] Diddams S A, Vahala K, Udem T. Optical frequency combs: coherently uniting the electromagnetic spectrum[J]. *Science*, 2020, 369(6501): eaay3676.
- [2] 郑佳琪, 丛振华, 刘兆军, 等. 高重复频率超短激光脉冲产生及频率变换技术发展趋势[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1201008. Zheng J Q, Cong Z H, Liu Z J, et al. Recent trend of high repetition rate ultrashort laser pulse generation and frequency conversion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1201008.
- [3] Gerginov V, Tanner C E, Diddams S A, et al. High-resolution spectroscopy with a femtosecond laser frequency comb[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13): 1734-1736.
- [4] Heinecke D C, Bartels A, Fortier T M, et al. Optical frequency stabilization of a 10 GHz Ti: sapphire frequency comb by saturated absorption spectroscopy in <sup>87</sup>Rubidium[J]. *Physical Review A*, 2009, 80(5): 053806.
- [5] Feng Y, Lamour T P, Ostapenko H, et al. Towards a space-qualified Kerr-lens mode-locked laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(21): 5429-5432.
- [6] Jang Y S, Kim S W. Distance measurements using mode-locked lasers: a review[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2018, 1(3): 131-147.
- [7] Thorpe M J, Moll K D, Jones R J, et al. Broadband cavity ringdown spectroscopy for sensitive and rapid molecular detection [J]. *Science*, 2006, 311(5767): 1595-1599.
- [8] 郑立, 汪会波, 田文龙, 等. LD 泵浦的高重复频率全固态飞秒激光器(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(12): 20201069. Zheng L, Wang H B, Tian W L, et al. LD-pumped high-repetition-rate all-solid-state femtosecond lasers (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201069.
- [9] Wasylczyk P, Wnuk P, Radzewicz C. Passively modelocked, diode-pumped Yb:KYW femtosecond oscillator with 1 GHz repetition rate[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5630-5635.
- [10] 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.
- [11] Endo M, Ozawa A, Kobayashi Y. 6-GHz, Kerr-lens mode-locked Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser for comb-resolved broadband spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(21): 4502-4505.
- [12] Endo M, Ito I, Kobayashi Y. Direct 15-GHz mode-spacing optical frequency comb with a Kerr-lens mode-locked Yb: Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1276-1282.
- [13] Kimura S, Tani S, Kobayashi Y. Kerr-lens mode locking above a 20 GHz repetition rate[J]. *Optica*, 2019, 6(5): 532-533.
- [14] Kimura S, Nakamura T, Tani S, et al. Anomalous spectral broadening in high quality-factor, 1-GHz mode-locked oscillator using Yb: CALGO crystal[C]// CLEO Pacific Rim Conference, July 29-August 3, 2018, Hong Kong, China. Washington, D.C.: OSA, 2018: W4A.8.
- [15] 李丽, 樊仲维, 余锦, 等. Yb:KGW 飞秒激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 110004. Li L, Fan Z W, Yu J, et al. Research progress of Yb: KGW femtosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 110004.
- [16] Biswal S, O'Connor S P, Bowman S R. Thermo-optical parameters measured in ytterbium-doped potassium gadolinium tungstate[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(15): 3093-3097.
- [17] Yang J F, Wang Z H, Song J J, et al. Diode-pumped 13 W Yb:KGW femtosecond laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(2): 021404.
- [18] Major A, Nikolakakos I, Aitchison J S, et al. Characterization of the nonlinear refractive index of the laser crystal Yb: KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> [J]. *Applied Physics B*, 2003, 77(4): 433-436.
- [19] Paunescu G, Hein J, Sauerbrey R. 100-fs diode-pumped Yb: KGW mode-locked laser[J]. *Applied Physics B*, 2004, 79(5): 555-558.
- [20] Zheng L, Tian W L, Liu H, et al. 2-GHz watt-level Kerr-lens mode-locked Yb: KGW laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 12950-12957.
- [21] Zheng L, Chen Y H, Tian W L, et al. 1.6-GHz, 3.3-W Kerr-lens mode-locked Yb: KGW oscillator pumped by a multimode laser diode[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 15-20, 2022, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2022: SS2A.6.

# LD-Pumped Kerr-Lens Mode-Locked Yb:KGW Femtosecond Laser with GHz Repetition Rate

Chen Yuehang<sup>1</sup>, Zheng Li<sup>1</sup>, Mai Haijing<sup>1</sup>, Yu Yang<sup>2</sup>, Tian Wenlong<sup>1\*</sup>, Zhu Jiangfeng<sup>1\*\*</sup>, Wei Zhiyi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China;*

<sup>2</sup>*Academy of Advanced Interdisciplinary Research, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China;*

<sup>3</sup>*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China*

## Abstract

**Objective** Optical frequency combs based on femtosecond lasers are powerful tools for the development of precision metrology.

Femtosecond lasers with high repetition rates are particularly important when optical-frequency combs are applied to spectroscopy. However, it is difficult to realize high-repetition-rate Kerr-lens mode-locking because of the weak Kerr nonlinear effect. Due to the mode matching limitation of soft aperture Kerr-lens mode-locking, a single-mode fiber-coupled laser diode (LD) is usually used as the pump source, and an output coupling (OC) mirror with low transmittance is chosen to improve the intracavity peak power, resulting in a low output power. Output power is an important parameter when a high-repetition-rate laser is used for optical frequency comb generation. Therefore, it is essential to improve the output power of GHz-mode-locked lasers.

**Methods** The Yb : KGW crystal is an excellent candidate for Kerr-lens mode-locking because of its high nonlinear refractive index of  $2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{W}$ . It has a large absorption cross section ( $1.22 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ) at 980 nm, which additionally supports its high pumping efficiency. Moreover, the emission cross section at 1023 nm is as high as  $2.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , meaning it has a high gain, which is expected to achieve a high power output. Based on the above properties, we demonstrate a high-power Kerr-lens mode-locked Yb : KGW femtosecond laser with 1 GHz repetition rate.

The experimental setup is shown in Fig. 1. Single-mode fiber-coupled LDs with center wavelengths of 976 nm and 979.5 nm are selected as the pump sources. To improve the mode matching, the pump light is collimated and focused through a coupling system with an imaging ratio of 1 : 3, and the radius of the focused pump spot is 11  $\mu\text{m}$ . A 2-mm long Yb : KGW crystal coated with an anti-reflection film @ 980–1100 nm on both transparent surfaces is used as the gain medium. During the experiment, the crystal is wrapped with indium foil and mounted on a water-cooled copper heat sink block to ensure effective heat dissipation. The resonant cavity is a four-mirror ring cavity with a total cavity length of 274.5 mm, corresponding to a repetition rate of 1.093 GHz.  $M_1$  and  $M_2$  are concave mirrors with a radius of curvature (ROC) of 50 mm, and  $M_2$  and  $M_3$  are interferometer (GTI) mirrors providing  $-1600 \text{ fs}^2$  (1035–1055 nm) group delay dispersion (GDD) in total per round trip. An OC with a transmittance of 0.4% is selected to ensure a sufficiently high power in the cavity.

**Results and Discussions** First, using the 976 nm single-mode LD as the pump source, mode-locking with an average power output of 90 mW at a center wavelength of 1045 nm and a full width at half maximum (FWHM) of 4.5 nm is achieved [Fig. 2(a)], and the corresponding pulse duration is 265 fs [Fig. 2(b)]. To increase the output power of mode-locking, the pump source is replaced with a 979.5 nm single-mode LD, whose wavelength is closer to the main absorption peak wavelength of the crystal. In addition, the polarization of the pump light is adjusted using a half-wave plate to further improve the absorption efficiency of the crystal. Consequently, the average power of unidirectional mode-locking is increased to 151 mW. The FWHM of the optical spectrum is approximately 4.2 nm at a center wavelength of 1045 nm [Fig. 3(a)], and the corresponding pulse duration is 249 fs [Fig. 3(b)]. In the laboratory environment, mode-locking can be self-started only by increasing the pump power, and the root mean square (RMS) value of power fluctuations within 24 h is 0.76% [Fig. 4(b)]. The power jitter in the vicinity of 3 h and 6 h is because of environmental vibration and other factors that cause the laser to move out of the stable mode-locked state; however, it can restart in a short time. The signal-to-noise ratio of the 1.029 GHz fundamental frequency signal in radio frequency spectrum is 62 dB [Fig. 4(a)].

**Conclusions** We report a 1 GHz Kerr-lens mode-locked Yb : KGW laser pumped by a laser diode. A 976 nm single-mode fiber-coupled laser diode is used as the pump, and a stable mode-locked operation at a repetition rate of 1 GHz with an output power of 90 mW is obtained in a bow-tie ring cavity with a pulse duration of 265 fs. By using a 979.5 nm single-mode laser diode as the pump source and adjusting the polarization of the pump beam, the output power is increased to 151 mW at a center wavelength of 1045 nm, and the corresponding pulse duration is 249 fs.

**Key words** lasers; all solid-state lasers; GHz repetition rate; Kerr-lens mode-locking