

LD 泵浦的高重复频率全固态飞秒激光器 (特邀)

郑立¹, 汪会波^{1,2}, 田文龙¹, 张大成¹, 韩海年², 朱江峰¹, 魏志义²

- (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)

摘要: GHz 飞秒激光器相比于传统的百 MHz 飞秒激光器, 其频域中相邻纵模的间隔更大、可分辨率更高, 相同光谱范围内纵模密度更小, 每个纵模分得的平均功率相对更高, 在梳齿可分辨光谱学、直接频率梳光谱学、光学任意波形产生以及天文摄谱仪校准等诸多领域有着更重要的应用价值。文中从 GHz 飞秒脉冲的产生方案出发, 着重对激光二极管泵浦的 GHz 重复频率全固态飞秒激光的产生方案以及相应的技术挑战进行了详细介绍, 然后重点综述了国际上基于 SESAM 被动锁模以及克尔透镜锁模全固态 GHz 飞秒激光器的研究进展, 并结合笔者所在课题组取得的初步研究结果对全固态 GHz 重复频率飞秒激光器的应用价值以及笔者所在课题组的研究目标进行了展望。

关键词: GHz 重复频率; 全固态飞秒激光器; 克尔透镜锁模; 被动锁模

中图分类号: TN242 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201069

LD-pumped high-repetition-rate all-solid-state femtosecond lasers (*Invited*)

Zheng Li¹, Wang Huibo^{1,2}, Tian Wenlong¹, Zhang Dacheng¹, Han Hainian², Zhu Jiangfeng¹, Wei Zhiyi²

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

Abstract: Compared with traditional ~100 MHz femtosecond lasers, the mode spacing is larger of GHz femtosecond lasers so that each comb can simply be resolved. Furthermore, the less dense of longitudinal modes results in higher average power. Therefore, it has more important application value in many research fields, such as comb-resolvable spectroscopy, direct optical frequency comb spectroscopy, optical arbitrary waveform generation and astronomical spectrograph calibration. In this review, the generation schemes of GHz femtosecond pulses and the corresponding technical challenges of GHz-repetition-rate all-solid-state femtosecond lasers pumped by laser diode were introduced in detail firstly. Secondly, the international research progresses of all-solid-state GHz femtosecond lasers based on SESAM passively mode-locking and Kerr-lens mode-locking were summarized. Finally, the application value and research object of our group in all-solid-state GHz-repetition-rate femtosecond lasers were forecasted based on our preliminary research results.

Key words: GHz repetition rate; all-solid-state femtosecond lasers; Kerr-lens mode locking; passively mode locking

收稿日期: 2020-09-12; 修订日期: 2020-10-14

基金项目: 国家自然科学基金 (11774277, 60808007); 中央高校基本科研业务费 (JB190501, ZD2006); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2019JCW-03)

作者简介: 郑立 (1995-), 男, 博士生, 主要从事全固态激光技术方面的研究。Email: zhengli@stu.xidian.edu.cn

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

1960 年, T. H. Maiman 研制出第一台脉冲运转的红宝石激光器, 一年后, A. Javan 等人搭建了第一台连续运转的激光器, 并证明了激光的相干性^[1-2]。在此之后, 激光凭借其高亮度、高方向性和高相干性的特点吸引着大批科学家的注意。1965 年, 锁模技术的诞生将红宝石激光器的输出脉宽减小到皮秒 (ps, 10^{-12} s) 量级^[3], 1981 年, R. L. Fork 在染料激光器中使用碰撞锁模技术又使得激光脉冲宽度到达飞秒 (fs, 10^{-15} s) 量级^[4]。1985 年, 啁啾脉冲放大 (Chirped Pulse Amplification, CPA) 技术的发明^[5]使超短激光的峰值功率可到达拍瓦 (PW, 10^{15} W) 量级^[6]。

随着超快激光技术的不断发展, 阿秒 (as, 10^{-18} s) 量级的时间尺度、PW 量级的峰值功率在为科学前沿研究领域带来新的研究方法和契机的同时, 基于超短脉冲激光诞生的飞秒光学频率梳^[7] 像一个精密的齿轮一样将无线电和光学领域相干连接起来, 为精密计量学的发展打开了一扇新的大门^[8-9]。锁模激光器的重复频率是表征光学频率梳的重要特性之一, 特别是当飞秒光学频率梳应用于光谱学时, 需要尽可能高的重复频率。而高重复频率的优势主要体现在以下两个方面: 首先, 在频域中, 相邻梳齿之间的间隔代表锁模激光器的重复频率, 重复频率越高, 激光脉冲的各个纵模之间的频率间隔越大, 这意味着在同等光谱覆盖范围内梳齿密度更小, 因此在相同平均功率下, 每个纵模可分得的平均功率相对更高, 在用于光频率拍频实验测量时, 可获得更高的信噪比; 其次, 梳齿间隔越大, 降低了对波长计或光谱仪的分辨率要求, 更容易利用商用的光谱仪分辨出每根梳齿, 实现梳齿线宽精度的高精度光谱分析。因此, 在宽带梳齿可分辨光谱学^[10]、直接频率梳光谱学^[11]、光学任意波形合成^[12]、超稳定微波参考^[13]以及天文摄谱仪校准^[14]等诸多应用中, 都需要借助基于高重复频率飞秒激光器产生的光学频率梳。

文中从 GHz 重复频率的飞秒激光器的产生方案出发, 首先对其面临的技术挑战以及国际上常用的实验方法进行了详细介绍, 之后重点综述了国际上全固态 GHz 飞秒激光器的研究进展, 并结合笔者所在课题组该方面的初步研究结果对其进一步的发展方向以及课题组后续研究目标进行了展望。

1 产生 GHz 重复频率飞秒脉冲的挑战

GHz 重复频率的飞秒激光可以通过腔外滤波的方法获得, 也可以直接从振荡器输出。腔外滤波主要通过法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 腔^[15]来实现, 根据 F-P 干涉仪的多光束干涉原理, 将原腔的纵模滤掉一部分, 实现重复频率的倍增。但是也存在两个问题: 一是边模泄漏, 如果 F-P 腔的线宽过宽, 本该滤掉的临近的纵模则会透过; 二是带宽问题, F-P 腔镜膜系产生的色散使腔的纵模间隔不均匀, 本该透过的模式可能会偏离透过峰。从振荡器直接输出 GHz 重复频率的飞秒脉冲主要有三种方案, 分别是谐波锁模^[16]、基于半导体可饱和吸收镜 (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM) 的被动锁模^[17]以及克尔透镜锁模 (Kerr-lens Mode-locking, KLM)^[18]。其中谐波锁模一般多应用于光纤激光器中, 根据孤子光脉冲面积定理, 当脉冲的能量超过一定值时, 会分裂形成高阶孤子, 在锁模激光器中, 这些高阶孤子的重复频率是基频的倍数, 因此被用来倍增重复频率, 但是谐波锁模产生的 GHz 飞秒脉冲的时间抖动要比在基频工作的激光器强得多^[19]。SESAM 被动锁模技术和 KLM 技术则是钛宝石飞秒激光器和激光二极管 (LD) 泵浦的全固态飞秒激光器中最常用的手段, 根据重复频率与谐振腔腔长的反比关系, 为了获得 GHz 重复频率, 缩短腔长是唯一也是最直接的方法。文中, 笔者将主要针对 SESAM 被动锁模技术和 KLM 技术在应用于 GHz 全固态飞秒激光器产生时面临的技术挑战进行详细分析。

1.1 GHz 重复频率对谐振腔结构的限制

GHz 重复频率对飞秒激光器结构的限制主要体现在两个方面, 首先是对谐振腔腔长的限制, 使得重复频率在 1 GHz 以上的飞秒激光器可用腔型单一, 并且搭建困难。如图 1 所示, “X 型”线性谐振腔是全固态飞秒激光器中最基本的腔型, 脉冲激光在腔内振荡的重复频率与其在谐振腔内循环一周的光程有关, 具体可表示为:

$$f_r = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

式中: c 为光速; L 为谐振腔的光学长度。因此, 为了获得重复频率大于 1 GHz 的超短脉冲, 谐振腔的腔长必须小于 150 mm, 使腔内各光学元件的空间摆放位置

都受到很大限制。对于 KLM 飞秒激光器而言,以图 1 所示的谐振腔腔型为例,包括两片凹面镜 (M1、M2, 曲率半径一般小于 50 mm) 形成的共焦腔、用于产生激光的增益介质、用于补偿腔内正色散的色散补偿镜 M3 以及耦合输出镜 OC。只要保证谐振腔的光学腔长小于 150 mm,借助 KLM 技术和合理的腔内色散管理,即有望获得 GHz 飞秒脉冲输出。对于 SESAM 被动锁模飞秒激光器而言,与 KLM 腔型相比,需要一块 SESAM 作为启动锁模和稳定锁模的光学元件,因此为了保证 GHz 的重复频率,需要根据 SESAM 的锁模原理和特性对图 1 所示的腔型进行改进,图 2 即为常用的 SESAM 被动锁模 GHz 飞秒激光器腔型。其中平面双色镜 M1 和凹面镜 M2 作为腔镜,同时 M2 也作为色散补偿镜, M3 在作为耦合输出镜的同时,也带有一定曲率,将激光聚焦至 SESAM 启动锁模。关于高重复频率条件下的 KLM 和 SESAM 被动锁模的技术难点将在下一节进行详细讨论。

以上两种谐振腔结构均为线性腔,而对于高重复频率的 KLM 激光器,不得不介绍一种更为实用的腔型——“蝴蝶形”环形腔,如图 3 所示。在环形腔中,脉冲激光的重复频率为:

$$f_r = \frac{c}{L} \quad (2)$$

显而易见,与线性腔相比,在谐振腔的光学长度相同时,环形腔可支持的重复频率更高,因此,在同等重复频率下,环形腔对腔内几何结构容忍度更大,这

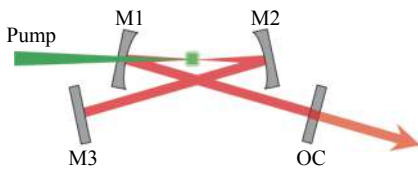


图 1 “X 型”高重复频率谐振腔

Fig.1 “X type” high-repetition-rate resonant cavity

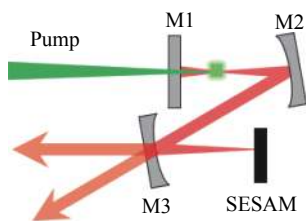


图 2 SESAM 被动锁模高重复频率谐振腔

Fig.2 Passively mode-locking high-repetition-rate resonant cavity based on SESAM

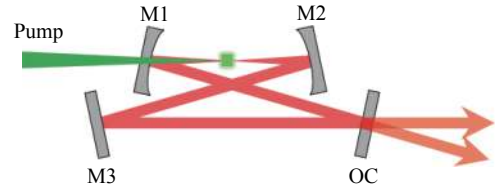


图 3 “蝴蝶形”高重复频率环形腔

Fig.3 “Bow-tie” high-repetition-rate ring cavity

也是环形腔用于 GHz 重复频率 KLM 飞秒激光器的最大优势。除此之外,与线性腔相比,激光脉冲在环形腔中传输时,每一次循环只通过晶体一次,因此引入的色散会减小一半,使腔内不易被补偿的高阶色散显著减小,有利于宽光谱飞秒激光的获得;同时,环形腔中没有空间烧孔效应,自相位调制和群延时色散在腔内自动同性分布,并且在高功率不对称的谐振腔结构中,也可有效抑制腔内双脉冲及多脉冲效应。

通过对以上几种目前最常用的 GHz 飞秒激光器腔型的介绍,结合图 4、图 5 中展示的重复频率为 1.2 GHz^[20] 的线性腔飞秒激光器实物图以及 15 GHz^[21] 的环形腔飞秒激光器实物图,不难理解 GHz 飞秒激光器在搭建过程中的困难。GHz 重复频率对飞秒激光器结构的另一限制体现在腔内可用光学元件的数量上。因为对于飞秒激光器而言,除了必须使激光在谐振腔内满足自在现条件,还需要合理的色散补偿,从而使锁模脉冲宽度处于飞秒量级,而光学元件数量的限制使色散补偿变得困难。

常用于超短脉冲色散补偿的元件主要有棱镜对以及 Gires-Tournois 反射镜 (GTI 镜) 或者啁啾反射镜。棱镜对在用于补偿腔内色散时,可以通过控制棱镜插入量以及分开距离很方便地调控引入的二阶色散,但是在 GHz 重复频率的腔长要求下,显然不适用。只在 1994 年, M. Ramaswamy-Paye 等人在棱镜对

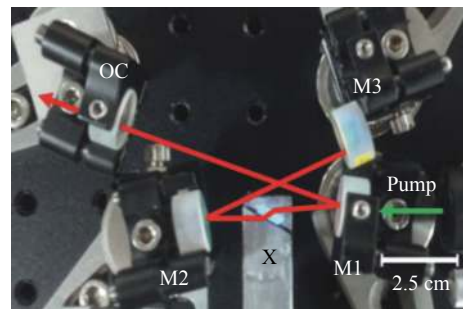


图 4 1.2 GHz 线性腔飞秒激光器^[20]

Fig.4 1.2 GHz linear femtosecond laser^[20]

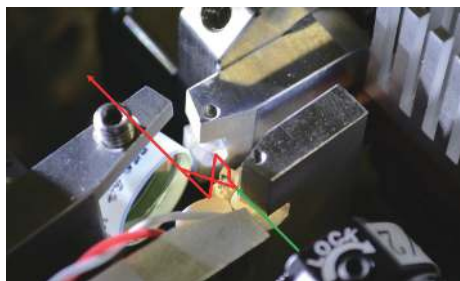


图 5 15 GHz 环形腔飞秒激光器^[21]

Fig.5 15 GHz ring femtosecond laser^[21]

补偿色散的原理上做了些许改动,使用单块棱镜作为色散补偿元件,为长度大于 3 mm 的钛宝石晶体提供了足够的负色散,同时也作为耦合输出镜,谐振腔腔长小于 15 cm,得到了重复频率为 1 GHz、脉冲宽度为 111 fs 的锁模结果^[22],如果继续使用棱镜补偿色散很难获得更高的重复频率。GTI 镜与啁啾反射镜用于补偿色散时,没有空间位置上的要求,因此更适合用于 GHz 飞秒激光器中。GTI 镜是在标准的四分之一膜系中,插入一个二分之一波长的奇数倍的低折射率层,也可以当作一个反射式干涉仪,能提供大量的群延迟色散 (Group Delay Dispersion, GDD),但是难以在宽带范围内获得均匀的色散特性。因此在百 MHz 的飞秒激光器中,常常选用多片 GTI 镜配合使用,使其在预想的带宽范围内提供足够的 GDD,最终获得更接近傅里叶变换极限的飞秒脉冲。而在 GHz 飞秒激光器中,由于光学元件数量受限,往往只能使用一到两片 GTI 镜,因此只能补偿有限带宽内的正色散,限制了飞秒脉冲宽度的进一步压缩。啁啾反射镜通过连续改变膜层的共振波长,使整个反射镜在保持高反射率的同时,给予不同波长以不同的延迟,可以在宽带范围内提供负色散,但是色散量较小,并且单片啁啾反射镜的群延迟色散曲线会形成振荡,使色散补偿不充分。1997 年, F. X. Kärtner 等人提出了双啁啾镜的概念^[23],通过啁啾反射镜的配对使用有效减小了振荡,在宽带范围内获得了均匀的色散特性,但是可提供的色散量依旧较小。总体而言,GTI 反射镜与啁啾反射镜将色散元件与镜片集成化,更适合用于 GHz 飞秒激光器中的色散补偿,也是目前最常用的色散补偿手段。

1.2 GHz 重复频率条件下的锁模运转

GHz 重复频率下腔长的缩短在限制腔型结构和

可用的光学元件数量的同时,导致的单脉冲能量大幅降低是实现 SESAM 被动锁模或者 KLM 获得 GHz 飞秒脉冲的最大挑战之一。飞秒脉冲的重复频率 f_r 与单脉冲能量 E_p 的关系可以简单表示为:

$$E_p = \frac{P_{av}}{f_r} \quad (3)$$

式中: P_{av} 为飞秒脉冲的平均输出功率。因此,大多数 GHz 飞秒激光器的单脉冲能量都小于 1 nJ,甚至仅有几十 pJ,在如此低的脉冲能量下,无论是 SESAM 被动锁模亦或是 KLM,都变得非常困难。

对于 LD 泵浦的全固态 SESAM 被动锁模激光器而言,重复频率越高,越容易发生不稳定的调 Q^[24-25],而调 Q 锁模的重复频率在 kHz 范围,具有较高的脉冲能量,很有可能使腔内元件受到光学损伤,有研究指出可以通过控制 SESAM 的反饱和吸收特性来更好地抑制调 Q 锁模的发生。对于 SESAM 而言,激光能量越高,其反射率越高,对应的损耗越小,然而当入射激光能量超过一定值时,反射率会变低,出现翻转现象。研究表明,这种反射率的翻转可能是由于 SESAM 中发生的双光子吸收、俄歇复合、热载流子产生、晶格升温等造成,这种效应被称作反饱和吸收效应,可用 SESAM 的反饱和吸收通量 F_2 定量描述^[26],如果只考虑双光子吸收作为反饱和吸收的来源,对于孤子脉冲, F_2 与脉冲能量成反比^[27]。用 E_{crit} 表示稳定锁模所需要的临界脉冲能量,它与 F_2 以及 SESAM 的参数、腔内激光参数之间的关系可表示为^[27]:

$$E_{crit}^2 = \frac{F_{sat,abs} A_{abs} \Delta R}{\frac{1}{F_{sat,gain} A_{gain}} + \frac{1}{F_2 A_{abs}}} \quad (4)$$

式中: $F_{sat,abs}$ 和 $F_{sat,gain}$ 分别代表 SESAM 和增益介质的饱和通量; A_{abs} 和 A_{gain} 为 SESAM 上和增益介质中的激光模式大小; ΔR 为 SESAM 的调制深度。从公式 (4) 可以看出, F_2 的值越小,稳定锁模的阈值能量越低,而多 GHz 重复频率导致调 Q 趋势增加,调 Q 锁模会使得入射在 SESAM 上的单脉冲能量极高,产生过强的反饱和吸收,最终使 SESAM 的反射率大幅下降,甚至小于连续光输出时的反射率,增加了 SESAM 的吸收通量和热负荷,甚至造成元件损坏。因此在 SESAM 被动锁模的全固态 GHz 飞秒激光器中,为了尽量降低锁模阈值,需要将 F_2 控制在较小的水平;同时为了

避免调 Q 脉冲造成的 SESAM 损伤,需要合理地利用克尔透镜效应配合合理的腔型设计使腔内激光发生自散焦效应,最终使 SESAM 上的激光模式随克尔效应的增强而变大,而增益介质中的激光模式并不发生强烈改变以保证较好的模式匹配。或者采用高亮度高功率的多模光纤耦合的 LD 作为泵浦源来弥补高重复频率下过低的单脉冲能量引起的调 Q 现象也是不错的选择。

对于全固态 KLM 飞秒激光器而言,不需要额外的启动锁模元件,KLM 是一种与光强有关的脉冲选择机制,主要依赖于与光强和增益介质的非线性折射率有关的克尔效应,克尔效应形成克尔透镜,使激光腔中的光束产生自聚焦。通过引入硬孔光阑(物理光阑)将脉冲中低功率密度部分损耗掉,使高功率密度部分通过,并在增益介质中不断放大,使时域不断被窄化,从而获得脉宽很窄的锁模脉冲。而在大多数 KLM 飞秒钛宝石振荡器以及 LD 泵浦的全固态振荡器中,借助软孔光阑引入的非线性损耗调制实现 KLM 是最常用的方法。这种方法要求泵浦光斑尺寸略小于锁模激光的光斑尺寸,但是在 GHz 飞秒激光器中,所用共焦腔腔镜的曲率半径大多小于 50 mm,激光束腰直径会被聚焦至 50 μm 左右。因此常用的多模光纤耦合的 LD 作为泵浦源已不再适用,因为目前商用的多模光纤芯径一般为 100~200 μm ,更重要的是其输出激光的光束质量因子 M^2 过大,很难将其聚焦至 50 μm 以下。

为了更好地达到软孔光阑锁模的条件,目前国际上 GHz 全固态 KLM 飞秒激光器最常用的泵浦源是单模光纤(芯径约为 6 μm)耦合的高亮度 LD。而这又出现了另一个问题,笔者前面提到过克尔效应与增益介质的非线性折射率以及其中的激光强度有关,而单模光纤耦合的 LD 可得到的最大输出功率约为 1 W,极大地限制了腔内的激光强度。同时,若忽略腔内高阶色散,KLM 飞秒激光器中,脉冲宽度 τ 与单脉冲能量 E_p 、腔内净色散 D 、非线性折射率 n_2 、增益介质长度 d 、激光中心波长 λ 以及增益介质中的激光束腰半径 ω_0 之间的关系可表示为^[28]:

$$\tau = 4 \ln(1 + \sqrt{2}) \frac{|D| \lambda \omega_0^2}{dn_2 E_p} \quad (5)$$

在谐振腔结构和色散补偿确定的条件下,脉冲宽

度仅与单脉冲能量有关,结合公式(3),可知高重复频率限制了短脉冲的形成。较长的脉冲结合低能量又会使腔内的峰值功率处于较低水平,限制了腔内的克尔效应,而这也是 GHz 全固态 KLM 飞秒激光器需要克服的最大困难,为了尽可能地提高腔内的激光强度,往往选用透过率很低的输出耦合镜,甚至使用高反镜作为输出耦合镜,使得输出功率进一步受限。

尽管 LD 泵浦的 GHz 重复频率全固态飞秒激光器存在诸多挑战,但近些年,依旧取得了非常优秀的成果,并正在进一步将其往更高重复频率、更加实用化的方向发展。

2 全固态 GHz 飞秒激光器的研究进展

如上所述,重复频率在 1 GHz 以上的飞秒激光器虽然存在诸多技术挑战,但是其本身的应用价值也不可忽略。因此早在 1990 年,美国贝尔实验室的 K. J. Weingarten 等人就开始了 GHz 激光器的实验研究,利用 LD 泵浦 Nd:YLF 晶体,通过声光调制获得了 2 GHz 的皮秒激光输出^[29],此后,通过主动锁模手段,1 GHz^[30]、2.85 GHz^[31]、5 GHz^[32] 的报道不断涌现。在 SESAM 发明之后^[33],出现了大量 GHz 被动锁模 Nd:YVO₄ 激光器,最高重复频率甚至达到了 157 GHz^[34]。但是受限于主动调制器件的响应时间以及掺钕(Nd)晶体的增益带宽,得到的锁模脉冲宽度均在皮秒范围,使其应用范围受限。而光学频率梳作为锁模激光器最重要的应用之一,在精密测量领域不仅要求锁模激光具有较窄的脉冲宽度,使得输出光谱覆盖一定的带宽范围从而保证足够的梳齿数量;还要保证足够高的重复频率,使得飞秒光学频率梳的梳齿间隔足够大,提高其可分辨率,降低对波长计或者光谱仪的分辨率要求。具有宽调谐范围的钛宝石晶体,可支持周期量级的飞秒脉冲,在 GHz 重复频率飞秒激光器中取得了很多优秀的结果^[35-37],最高重复频率也提升到了 10 GHz,脉冲宽度也短至 40 fs,并由此产生了重复频率 10 GHz 的飞秒光学频率梳^[38]。不可否认,钛宝石飞秒激光器在高重复频率、短脉冲宽度以及高输出功率方面都有着很大优势,产生的飞秒光学频率梳具有高稳定性和低噪声的特性,但是,昂贵且笨重的绿光激光器作为泵浦源,不仅成本高,而且似乎与紧凑小巧的 GHz 飞秒振荡器显得格格不入,使其在小型实

用化方面受到限制。光纤飞秒激光器无需复杂的空间光路结构,凭借结构稳定、体积小巧的特点也被广泛应用于光学频率梳产生,光纤光学频率梳甚至已执行过航天任务^[39],在 GHz 重复频率方面也有着不错的表现,最高重复频率也达到了 19.5 GHz^[40]。但是 GHz 光纤激光器的腔长极短限制了增益光纤的长度,使得输出功率处于较低水平;同时,光纤本身固有的量子噪声降低了锁模脉冲的信噪比;这两方面的缺陷对 GHz 光纤飞秒激光器的应用产生了一定限制。当光学频率梳应用于天文多普勒视向速度测量中时^[41],由于高分辨率的天文阶梯光栅光谱仪可分辨的频率间隔在 10~30 GHz,因此为了匹配高分辨率天文光谱仪分辨本领,必须提高光学频率梳的重复频率。F-P 腔滤波法可以将固态光学频率梳或者光纤光学频率梳的重复频率大幅提高,虽然存在上文提到的些许问题,但却是有效产生数十 GHz 重复频率飞秒激光的有效手段^[42-43]。21 世纪初期,镱离子(Yb^{3+})掺杂的激光介质由于其优异的激光性质受到广泛关注^[44],其吸收峰在 940~980 nm 之间,可以利用技术成熟的 LD 直接抽运,不仅可以弥补 GHz 飞秒光纤振荡器平均输出功率低的缺点,而且相比钛宝石激光器而言,成本得到大幅降低,同时具备其低噪声、短脉宽的优点。借助 SESAM 被动锁模技术或者 KLM 技术,LD 泵浦的 GHz 重复频率全固态掺镱飞秒激光器迅速发展,在这里,笔者主要对其近年来的研究进展进行详细介绍。

2.1 基于 SESAM 被动锁模的全固态 GHz 飞秒激光器

2008 年,日本富士胶片公司 S. Yamazoe 等人利用 SESAM 被动锁模,率先在 LD 泵浦的 Yb:KYW 激光器中获得了重复频率 2.8 GHz 的飞秒激光输出,对应脉冲宽度为 162 fs、平均功率为 680 mW,将其封装模块化后,体积为 8 cm(长)×5 cm(宽)×3 cm(高),仅为掌上大小,图 6 为其封装模块。在 3000 h 自由运转情况下,功率抖动均方根小于 10%,如果对激光器进行主动控制,2000 h 内功率抖动均方根仅小于 1%^[45-46]。

2010 年,瑞士联邦理工学院(ETH Zurich)U. Keller 课题组凭借其得天独厚的 SESAM 制作工艺,用锥形分布式布拉格二极管激光器泵浦 Yb:KGW 晶体,得到了平均功率 1.1 W、脉冲宽度 281 fs 稳定孤子运转,即



图 6 掌上大小 GHz 飞秒激光器^[45]

Fig.6 Palm-top-size GHz femtosecond laser^[45]

使在 1 GHz 的重复频率下,单脉冲能量也达到了 1.1 nJ,在同样的装置下,通过进一步增加泵浦功率,观察到了 2、3、4 GHz 的谐波锁模状态,证明了谐波锁模在 LD 泵浦的全固态激光器(DPSSL)中实现多 GHz 运转的可行性^[47]。2011 年,同课题组的 S. Pekarek 等人继续利用 SESAM 被动锁模,得到了重复频率 1 GHz、平均功率 2.2 W、脉冲宽度 290 fs 的 Yb:KGW 激光器^[48]。为了进一步获得 GHz 的光学频率梳,通过模拟和实验,发现如果将脉冲宽度为 290 fs 的输出激光直接注入光子晶体光纤(PCF)中,由于脉冲宽度过大使孤子分裂阶数较高,并不能获得相干性良好的超连续光谱^[49]。因此,他们利用 1 m 长光纤产生的自相位调制(Self-phase Modulation, SPM)对振荡器输出光谱进行展宽,再配合 SP10 棱镜对进行压缩,将 290 fs 的种子光压缩到了 100 fs,此时注入长度为 2 m 的 PCF 中,产生了相干良好的超过一个倍频程的超连续谱。结合 $f-2f$ 自参考法,首次实现了对 GHz DPSSL 载波包络相位偏移频率(CEO)的探测。2012 年, S. Pekarek 等人继续利用 SESAM 被动锁模,在相似的实验装置中,将 Yb:KGW 激光器的重复频率提升到了 2.4、4.7、4.8 GHz,脉冲宽度分别为 290、360、396 fs,平均输出功率均为瓦级^[50-51],图 7 为 4.8 GHz Yb:KGW 飞秒激光器实物图和光路示意图。由于之前的实验表明脉冲宽度过大的飞秒脉冲无法产生相干性较好的超连续谱,因此,2013 年, A. Klenner 等人通过对谐振腔的合理设计,直接从 Yb:KGW 振荡器中获得了脉冲宽度为 125 fs 的超短激光输出,平均功率为 3.4 W,重复频率为 1.06 GHz,峰值功率达到了 22.7 kW,在不经过任何压缩或者放大的情况下,将其注入长度为 1 m 的 PCF 中,结合 $f-2f$ 自参考法,测得的 CEO 拍频信号大于 30 dB(分辨率带宽 100 kHz),可作为频率测量应用中的优质光源^[52]。

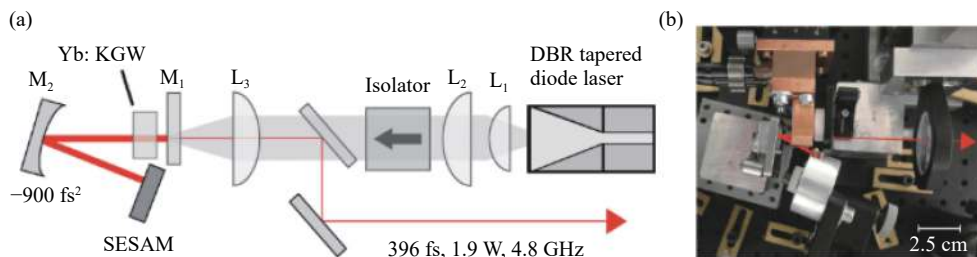


图 7 4.8 GHz Yb:KGW 飞秒激光器^[51]

Fig.7 4.8 GHz Yb:KGW femtosecond laser^[51]

相比 Yb:KYW 和 Yb:KGW 晶体而言, Yb:CALGO 晶体具有更宽和更平坦的发射带宽^[53], 可支持更短的飞秒脉冲输出, 因此也成为 GHz SESAM 被动锁模飞秒激光器的研究热点, U. Keller 课题组 A. Klenner 等人报道了一系列优秀的研究结果。2013 年, 他们实现亚 100 fs、重复频率 1.1 GHz、峰值功率 38.2 kW 的飞秒激光运转^[54]。2014 年, 同样在 Yb:CALGO 激光器中, 利用 SESAM 被动锁模, 得到了重复频率 1.8 GHz、平均功率 2.95 W、脉冲宽度小于 60 fs 的结果^[55]。同年, 在相同的 1.8 GHz 重复频率下, 入射泵浦功率为 8.66 W 时, 将平均输出功率提升到 3.5 W, 对应的光光转换效率和斜效率分别为 40.4% 和 57.4%, 脉冲宽度依旧小于 60 fs^[56]。之前笔者提到不稳定调 Q 趋势会随着重复频率的提高而增加, 为了克服这个问题, 2015 年, A. Klenner 等人提出了一种全光 Q 开关限制器以减少不稳定的调 Q 对锁模的影响, 同时提高锁模功率。激光在增益介质内产生的克尔效应会使激光发生自聚焦现象, 而通过适当的腔模设计组合克尔效应可以得到相反的结果, 使克尔效应产生自散焦现象而不是自聚焦, 从而增大腔内光学元件上的激光模式尺寸, 降低了各元件上的峰值功率密度并抑制了不稳定调 Q 的出现。最终依旧以 Yb:CALGO 为增益介质, 获得了重复频率 5 GHz、平均输出功率 4.1 W、脉冲宽度 96 fs 的锁模结果^[27]。2017 年, 在同样的指导思想下, A. S. Mayer 等人改变了传统的飞秒谐振腔结构, 在图 8 所示的 Yb:CALGO 激光器腔内插入了一块周期性极化铌酸锂晶体 (Periodically Poled Lithium Niobate Crystal, PPLN), 准相位匹配条件下, PPLN 的非线性折射率很强, 且为负值, 因此既可以使腔内激光产生自散焦效果, 也可以利用其产生负值的 SPM, 与腔内正 GDD 相互平衡, 即使在腔内净 GDD 处于 +1280 fs² 的情况下, 依旧可以实现稳定的孤子锁模,

最终将重复频率提升到了 10.6 GHz, 平均输出功率和脉冲宽度分别为 1.2 W 和 166 fs^[57]。2020 年, L. M. Krüger 等人在上一工作基础上, 详细研究了腔内色散、泵浦亮度和腔模设计对高重复频率锁模的影响, 在腔内净 GDD 为 +410 fs² 时, 获得了 108 fs 的最短锁模脉宽, 重复频率为 10.4 GHz, 平均输出功率 812 mW。并将其注入一块 Si₃N₄ 波导^[58] 中, 入射能量仅为 48 pJ 时, 即可获得覆盖一个倍频程的超连续谱, 在 100 kHz 的分辨率带宽下, 探测到的 CEO 拍品信号为 33 dB^[59]。

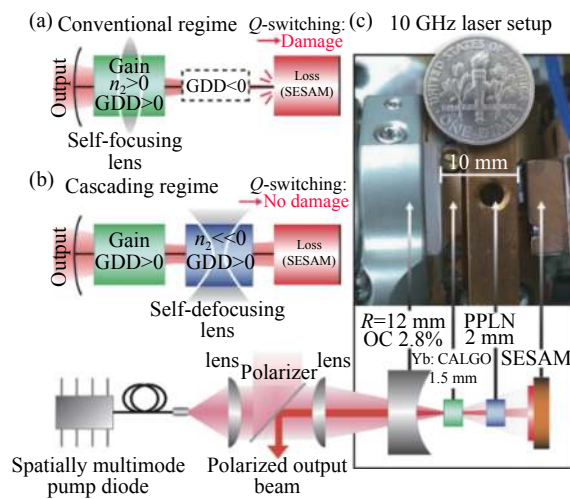


图 8 10.6 GHz Yb:CALGO 激光器^[57]

Fig.8 10.6 GHz Yb:CALGO femtosecond laser^[57]

基于 SESAM 被动锁模的全固态 GHz 飞秒激光器经过多年的研究, 重复频率已超过 10 GHz, 平均输出功率也大多超过 1 W, 最短脉冲宽度小于 60 fs, 多个报道结合 $f/2f$ 自参考法实现了 CEO 的探测, 为进一步获得全固态 GHz 飞秒光学频率梳打下坚实基础。笔者通过表 1 对以上提到的 SESAM 被动锁模全固态 GHz 飞秒激光器的各项参数进行总结。

表 1 SESAM 被动锁模全固态 GHz 飞秒激光器输出参数

Tab.1 Output parameters of all-solid-state GHz femtosecond lasers based on SESAM passively mode locking

Crystal	f_r /GHz	τ /fs	P_{av} /W	Ref.
Yb:KYW	2.8	162	0.68	[45-46]
Yb:KGW	1	281	1.1	[47]
Yb:KGW	1	290	2.2	[48]
Yb:KGW	2.4	290	2.3	[50]
Yb:KGW	4.7	360	1.8	[50]
Yb:KGW	4.8	396	1.9	[51]
Yb:CALGO	1.1	96	4.58	[54]
Yb:CALGO	1.8	59.4	2.95	[55]
Yb:CALGO	1.8	59.96	3.5	[56]
Yb:CALGO	5	96	4.1	[27]
Yb:CALGO	10.6	166	1.2	[57]
Yb:CALGO	10.4	108	0.812	[59]

2.2 基于 KLM 的全固态 GHz 飞秒激光器

在基于 SESAM 被动锁模的全固态 GHz 飞秒激光器快速发展的同时, KLM 全固态 GHz 飞秒激光器也受到广泛关注。2009 年, 波兰华沙大学物理研究所 P. Wasylczyk 等人利用图 3 所示的四镜环形腔结构, 以最大输出功率为 500 mW 的单模光纤耦合的 LD 泵浦 Yb:KYW 晶体, 首次通过 KLM 技术获得了重复频率大于 1 GHz 的全固态掺镱飞秒激光器, 平均输出功率为 114 mW, 锁模光谱带宽为 5.2 nm, 对应的变换极限脉宽约为 200 fs, 但没有自相关测量^[60]。之后, 日本东京大学固体物理研究所的 M. Endo 等人在 KLM 全固态 GHz 飞秒激光器中取得了一系列研究成果。2012 年, 他们同样以 Yb:KYW 晶体为增益介质得到了重复频率为 3.32 GHz 的飞秒激光输出^[61]。实验装置如图 9 所示, 同样是四镜环形腔结构, 不同之处在于耦合输出镜的透过率大小, 因为在其同事在 2010 年的 1.3 GHz KLM 实验中使用的耦合输出镜反射率约为 99.6%, 计算的腔内功率约为 25 W^[62], 而对于更高重复频率的 KLM, 不得不通过增加腔内功率来获得足够的克尔效应, 因此在 3.32 GHz 的实验中, 他们将反射率约为 99.6% 的耦合输出镜更换为高反镜, 将腔内的激光功率提高到了 50 W, 最终获得了稳定的 KLM 输出, 相应的代价则是在 750 mW 的泵浦下, 输出功率仅为 13.5 mW。同年, 在相似的实验装置中, 将腔内净色散控制在 -250 fs^2 , 以透过率仅为 0.03% 的啁啾镜作为耦合输出镜, 实现了重复频率

为 4.6 GHz 的 KLM 输出, 泵浦功率为 750 mW 时, 最大平均输出功率为 14.6 mW, 锁模光谱半高全宽为 11 nm, 对应的傅里叶极限变化脉宽为 146 fs, 但未给出自相关测量轨迹^[63]。2013 年, M. Endo 等人继续使用相同的谐振腔结构, 将增益介质更换为非线性折射率大小相当的 Yb:Lu₂O₃ ($n_2 = 8.6 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ ^[64], Yb:KYW 为 $8.7 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ ^[65]), 通过调节端镜的位置控制腔长, 实现了重复频率为 3.7 GHz 和 5.2 GHz 的飞秒激光输出, 由于重复频率足够高, 使用自制的超高分辨率光栅光谱仪可以清晰分辨出锁模光谱的每个纵模^[66]。之后, 他们又将 Yb:Lu₂O₃ 激光器的重复频率提升至 6 GHz, 由于输出功率过低, 仅为 10 mW, 无法得到自相关信号, 因此振荡器输出的脉冲被注入一段长 3 m 的 Yb 双包层光纤中进行功率放大, 在 3 W 的泵浦功率下, 放大后的平均输出功率为 200 mW, 对应的每个纵模功率约为 200 μW , 压缩后测得的脉冲宽度为 161 fs。借助其高重复频率的特点, 成功测得了亚稳态⁴He 原子的吸收光谱, 证明了这种高重复频率锁模激光在梳齿分辨宽带光谱学的应用价值^[67]。

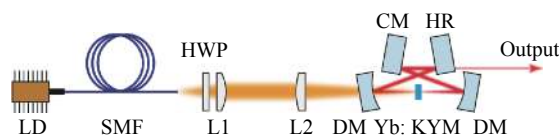


图 9 GHz KLM 飞秒激光器实验装置图

Fig.9 Experimental setup of GHz KLM femtosecond laser

当 GHz 飞秒激光器面向于天文台定标光谱仪应用时, 需求的重复频率通常为 12~20 GHz^[14]。因此, M. Endo 等人为了获得重复频率超过 10 GHz 的 KLM 输出, 将 Yb:Lu₂O₃ 更换为非线性折射率更高的 Yb:Y₂O₃ ($n_2 = 1.3 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{W}$ ^[64]), 在同样的四镜环形腔中, 继续以透过率为 0.04% 的啁啾镜作为耦合输出镜, 实现稳定锁模后, 在最大泵浦功率为 1.1 W 时, 得到了平均输出功率 60 mW、重复频率 15 GHz 的 KLM 输出, 使用分辨率为 16 pm 的光谱仪即可清晰观察到每根梳齿。紧接着将振荡器输出的 15 GHz 飞秒脉冲通过光纤放大器进行功率放大后, 输出功率为 300 mW, 压缩后测得的脉冲宽度为 152 fs。为了得到稳定的光梳系统, 使用压电陶瓷和模拟锁定电路将 15 GHz 的重复频率锁定到了 Rb 钟参考标准上, 由于极高重复频率的飞秒振荡器很难再利用 $f-2f$ 自参考法进行 CEO 的探测, 于是将输出激光的某根梳齿与中心波长为 1079 nm 的连续光激光器进行外差拍频, 再将获得的

拍频信号锁定在 173 MHz 的参考频率上,从而稳定了每个梳齿的光学频率,获得了一台稳定的 15 GHz 全固态 KLM 光学频率梳^[68]。2019 年,同课题组的 S. Kimura 等人为了进一步提高重复频率,打破了使用四镜环形腔结构获得 KLM 的传统做法,提出了一种紧凑的线性腔结构,类似于传统环形腔的半切割模型,实验装置如图 10 所示。其中,增益介质依然使用 Yb:Y₂O₃ 陶瓷,并且其中一面镀有双色啁啾膜层,另一面以布儒斯特角切割,同时,可以通过控制这种楔形激光介质的通光长度控制腔内净色散量。在 1 W 的泵浦功率下,实现了稳定的 KLM,平均输出功率为 20 mW,通过调节图 10(b)中 OC 的位置实现重复频率 18.3~23.8 GHz 的调谐,在重复频率为 20.1 GHz 时,得到的锁模脉冲宽度为 120 fs,重复频率为 23.8 GHz 时,脉冲宽度为 140 fs,脉冲在腔内循环一次的长度仅为 12.5 mm^[69]。

国际上近些年在 LD 泵浦的 GHz 重复频率全固态飞秒激光器中已经实现了重复频率超过 20 GHz 的锁模运转,但国内目前除了中国科学院物理研究所的张青等人报道的绿光泵浦的 1 GHz 亚 10 fs 钛宝石振

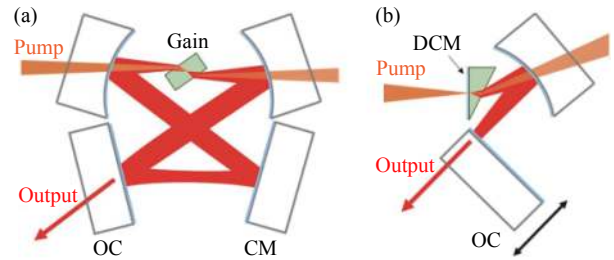


图 10 (a)“蝴蝶形”环形腔, (b) 提出的紧凑型线性腔结构

Fig.10 (a) Bow-tie ring cavity, (b) proposed compact linear cavity structure

荡器^[70]以及北京大学张志刚教授课题组和东南理工大学杨中民教授课题组在 GHz 光纤激光器中的相关研究^[71-72],还未见到 LD 泵浦的 GHz 重复频率全固态飞秒激光器的相关工作,因此国内在该方面的研究起步较晚。笔者所在课题组最近在 KLM 的 GHz 飞秒激光器中也取得了初步研究进展,采用传统的四镜环形腔结构,以非线性折射率较高的 Yb:KGW ($2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{W}$ ^[73]) 晶体为增益介质,合理补偿腔内色散,获得了稳定的 1 GHz 飞秒激光输出,锁模特性如图 11 所示,图 11(a)、(b)为测量的锁模脉冲宽度和锁

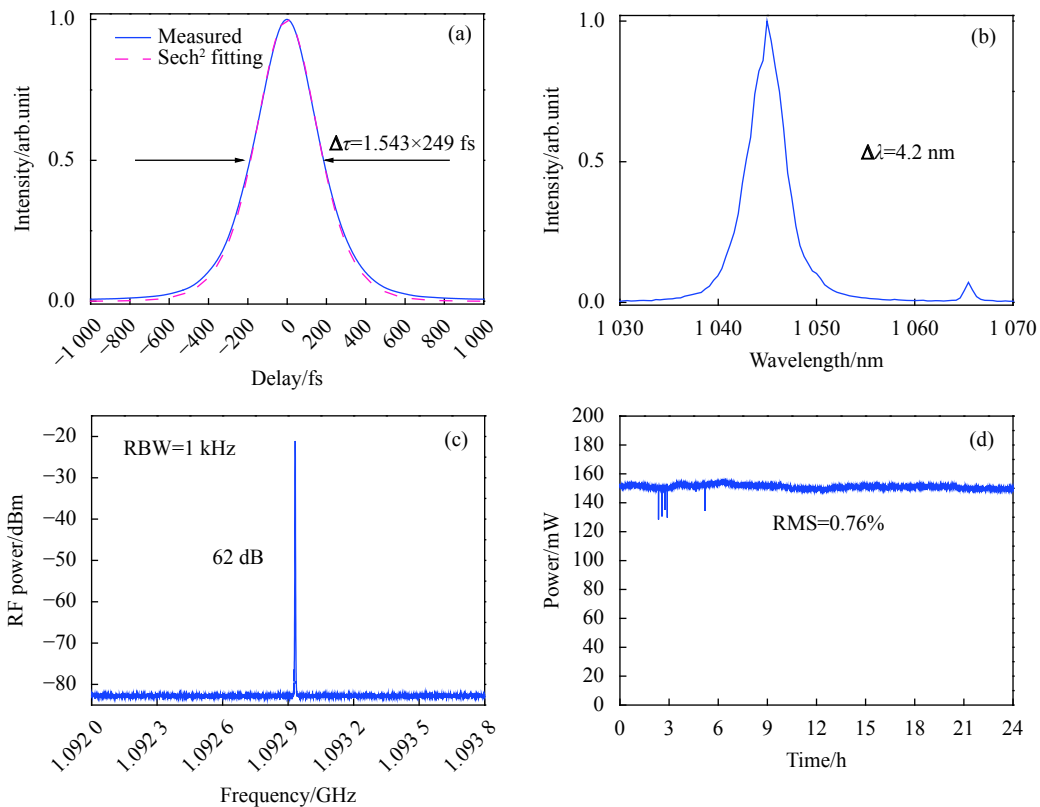


图 11 锁模特性: (a) 锁模脉宽, (b) 锁模光谱, (c) 基频 RF 频谱, (d) 24 h 稳定性测试

Fig.11 Characteristics of mode-locking: (a) pulse duration of mode-locking, (b) spectrum of mode-locking, (c) RF spectrum of fundamental frequency, (d) stability test in 24 h

模光谱,锁模光谱中心波长为 1045 nm,半高全宽为 4.2 nm,脉冲宽度为 249 fs;图 11(c)为基频频谱图,由于所用光电探头的带宽约为 350 MHz,在超出带宽后,信号强度会迅速下降,因此未测量对应的谐波频谱,但即使如此,测得的基频信号信噪比也大于 60 dB;在泵浦功率为 830 mW 时,平均输出功率约为 150 mW,图 11(d)为实验室环境下自由运转的功率曲线,24 h 功率抖动均方根 (RMS) 仅为 0.76%,前 6 h 中的几次功率突然降低可能是因为实验室温度变化以及空气抖动使激光脱离稳定锁模状态,但是均可以在短时间内实现自启动锁模,并继续保持十几小时的稳定运转,如果对整个实验装置进行封装处理,相信其稳定性将会进一步提高。

到目前为止,基于 KLM 的全固态 GHz 飞秒激光器由于锁模条件的严苛要求,大多只能采用光束质量较好的单模光纤耦合的高亮度 LD 做为泵浦源,虽然极大地限制了输出功率,但是重复频率已经提升至 20 GHz 以上,对应用于精密光谱学、高速数据通信等其他领域意义重大。在这里,通过表 2 对以上提到的 KLM 全固态 GHz 飞秒激光器进行总结。

表 2 KLM 全固态 GHz 飞秒激光器输出参数

Tab.2 Output parameters of KLM all-solid-state femtosecond lasers

Crystal	f_r /GHz	τ /fs	P_{av} /mW	Ref.
Yb:KYW	1	*200	114	[60]
Yb:KYW	3.32	*150	13.5	[61]
Yb:KYW	4.6	*146	14.6	[63]
Yb: Lu ₂ O ₃	3.7	—	—	[66]
Yb: Lu ₂ O ₃	5.2	165	—	[66]
Yb: Lu ₂ O ₃	6	161	10	[67]
Yb:Y ₂ O ₃	15	152	60	[68]
Yb:Y ₂ O ₃	23.8	140	20	[69]
Yb:KGW	1.1	249	150	Our work

*表示由锁模光谱计算的傅里叶极限变换脉宽,没有自相关曲线

3 结束语

无论是 KLM 钛宝石飞秒激光器,亦或是光纤飞秒激光器和 LD 泵浦的全固态飞秒激光器,在 GHz 重复频率运转方面都已经取得了突破性的研究进展,特别是 LD 泵浦的全固态掺镱飞秒激光器,近年来迅速

发展。基于 SESAM 的被动锁模已实现了 10 GHz、~100 fs 的高功率运转,并且成功测量 CEO 信号;基于 KLM 技术也已成功获得了重复频率超过 20 GHz 的飞秒激光输出。利用这些极高重复频率的飞秒光源产生的飞秒光学频率梳极大地推动了精密光谱学的发展,并且在天文摄谱仪的校准中,需要脉冲重复频率处于 5~50 GHz 的范围,才能使用光栅分辨出每个纵模,使得对系外行星的探索成为可能^[74];而诸如如今炙手可热的 5G 技术等新一代电子设备技术要求重复频率在 20 GHz 以上的钟用于高速数据通信和采集^[75]。

然而想要获得兼顾更高重复频率以及更高输出功率的飞秒激光,也存在一些亟需解决的问题。SESAM 被动锁模的全固态 GHz 激光器虽然可以实现瓦级的平均功率,脉冲宽度也可以保持在 100 fs 以内,但是如图 8 所示,10 GHz 的重复频率对应的谐振腔已经如此紧凑,想要进一步提升重复频率,高功率泵浦下的晶体散热模块设计、腔内色散补偿元件以及用于启动锁模的 SESAM 所需要的空间布局都面临着巨大的挑战,更重要的是需要依靠 SESAM 制作工艺的快速发展。而目前 KLM 全固态 GHz 飞秒激光器虽然已经实现了更高的重复频率,但由于锁模条件的苛刻要求,限制了可用的泵浦源,不仅限制了 GHz 全固态 KLM 飞秒激光器的输出功率,也使其输出脉宽受限。因此在后续应用中往往需要额外的放大系统,最终又会引入多余的噪声。

综上所述,如果有某种方案能利用 KLM 技术实现数 GHz 甚至数十 GHz 重复频率的飞秒激光运转,并兼顾高平均功率输出将会非常有趣。GHz 全固态 KLM 飞秒激光器除了需要满足传统 KLM 激光器要求的软孔锁模条件外,实现锁模的另一挑战则是高重复频率带来的腔内低峰值功率,使得无法产生足够的克尔效应。因此针对这两个问题,参考近几年在 LD 泵浦的块状 Yb 晶体中通过增益介质与克尔介质分离的方案,借助腔内插入的克尔介质提供足够的克尔效应,并在增益介质中使激光模式与泵浦光满足软孔锁模条件,最终即使在低亮度且光束质量很差的 LD 作为抽运源时,也可以实现的高功率窄脉宽飞秒激光输出^[76-77]。或许在 GHz 重复频率下也可以借助这种思想:一方面,以额外的克尔介质弥补腔内不足的克尔

效应;另一方面,以高功率多模 LD 作为泵浦源时,必然使泵浦光的聚焦光斑扩大,为了使 GHz 谐振腔内激光晶体中的激光模式与泵浦光模式良好匹配形成软孔光阑,需要对谐振腔结构进行合理设计,略微扩大激光模式。最终,在高功率多模 LD 的抽运下,获得多 GHz 高功率 KLM 飞秒激光运转。当然,随着光束质量优异的高亮度高功率 LD 的研制开发以及超快激光技术的进一步发展,或许不用更多复杂的方案,全固态 GHz 飞秒激光器也会获得更高重复频率、更高输出功率以及更短脉冲宽度的结果,笔者所在课题组也将在现有的研究基础上开拓创新,在更高重复频率 KLM 飞秒激光器以及多模 LD 泵浦的新型 GHz 高功率 KLM 全固态飞秒激光器的研制方面深入探索。相信 GHz 飞秒激光将在超快激光领域甚至各行各业中发挥更大作用,未来可期。

参考文献:

- [1] Javan A, Bennett W R, Herriott D R. Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a he-ne mixture [J]. *Phys Rev Lett*, 1961, 6: 106-110.
- [2] Javan A, Ballik E A, Bond W L, et al. Frequency Characteristics of a Continuous-Wave He-Ne Optical Maser [J]. *J Opt Soc Am*, 1962, 52: 96-98.
- [3] Mocker H W, Collins R J. Mode competition and self-locking effects in Q-switched ruby laser [J]. *Appl Phys Lett*, 1965, 7: 270-273.
- [4] Fork R L, Greene B I, Shank C V, et al. Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode locking [J]. *Appl Phys Lett*, 1981, 38: 671-672.
- [5] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Opt Commun*, 1985, 55: 447-449.
- [6] Perry M D, Pennington D, Stuart B C, et al. Petawatt laser pulses [J]. *Opt Lett*, 1999, 24: 160-162.
- [7] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. *Science*, 2000, 288: 635-639.
- [8] Diddams S A, Vahala K, Udem T. Optical frequency combs: Coherently uniting the electromagnetic spectrum [J]. *Science*, 2020, 369(6501): eaay3676.
- [9] Diddams S A, Udem T, Bergquist J C, et al. An optical clock based on a single trapped $^{199}\text{Hg}^+$ ion [J]. *Science*, 2001, 293: 825-828.
- [10] Diddams S A, Hollberg L, Mbele V. Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb [J]. *Nature*, 2007, 445: 627-30.
- [11] Stowe M C, Thorpe M J, Avi P, et al. Direct frequency comb spectroscopy [J]. *Adv At Mol Opt Phys*, 2008, 55: 1-60.
- [12] Cundiff S T, Weiner A M. Optical arbitrary waveform generation [J]. *Nat Photonics*, 2010, 4: 760-766.
- [13] Bartels A, Diddams S A, Oates C W, et al. Femtosecond-laser-based synthesis of ultrastable microwave signals from optical frequency references [J]. *Opt Lett*, 2005, 30: 667-669.
- [14] Wilken T, Curto G L, Probst R A, et al. A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level [J]. *Nature*, 2012, 485: 611-614.
- [15] Sizer T. Increase in laser repetition rate by spectral selection [J]. *IEEE J Quantum Elect*, 1989, 25: 97-103.
- [16] Herr S, Steinmetz T, Wilken T, et al. Optical mode structure of a harmonically mode-locked Yb femtosecond fiber laser[C]// CLEO: 2011-Laser Science to Photonic Applications. IEEE, 2011: 1-2.
- [17] Keller U, Weingarten K J, Kartner F X, et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 1996, 2: 435-453.
- [18] Spence D E, Kean P N, Sibbett W, et al. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti: sapphire laser [J]. *Opt Lett*, 1991, 16: 42-44.
- [19] Grudinin A B, Gray S. Passive harmonic mode locking in soliton fiber lasers [J]. *J Opt Soc Am B*, 1997, 14: 144-154.
- [20] Yang H W, Kim C, Choi S Y, et al. 1.2-GHz repetition rate, diode-pumped femtosecond Yb: KYW laser mode-locked by a carbon nanotube saturable absorber mirror [J]. *Opt Express*, 2012, 20: 29518-29523.
- [21] <https://yohei.issp.utokyo.ac.jp/worksGHzLaser.html>
- [22] Ramaswamy-Paye M, Fujimoto J G. Compact dispersion-compensating geometry for Kerr-lens mode-locked femtosecond lasers [J]. *Opt Lett*, 1994, 19: 1756-1758.
- [23] Kärtner F X, Matuschek N, Schibli T, et al. Design and fabrication of double-chirped mirrors [J]. *Opt Lett*, 1997, 22: 831-833.
- [24] Hönninger C, Paschotta R, Morier-Genoud F, et al. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking [J]. *J Opt Soc Am B*, 1999, 16: 46-56.
- [25] Paschotta R, Krainer L, Lecomte S, et al. Picosecond pulse sources with multi-GHz repetition rates and high output power [J]. *New J Phys*, 2004, 6(1): 174.
- [26] Grange R, Haiml M, Paschotta R, et al. New regime of inverse

- saturable absorption for self-stabilizing passively mode-locked lasers [J]. *Appl Phys B*, 2005, 80: 151-158.
- [27] Klenner A, Keller U. All-optical Q-switching limiter for high-power gigahertz modelocked diode-pumped solid-state lasers [J]. *Opt Express*, 2015, 23: 8532-8544.
- [28] Ye J, Cundiff S T. Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation and Applications[M]. Switzerland: Springer Science & Business Media, 2005.
- [29] Weingarten K J, Shannon D C, Wallace R W, et al. Two-gigahertz repetition-rate, diode-pumped, mode-locked Nd: YLF laser [J]. *Opt Lett*, 1990, 15: 962-964.
- [30] Zhou F, Malcolm G P A, Ferguson A I. 1-GHz repetition-rate frequency-modulation mode-locked neodymium lasers at 1.3 μm [J]. *Opt Lett*, 1991, 16: 1101-1103.
- [31] Weingarten K J, Godil A A, Gifford M. FM mode-locking at 2.85 GHz using a microwave resonant optical modulator [J]. *IEEE Photonics Tech Lett*, 1992, 4: 1106-1109.
- [32] Schulz P A, Henion S R. 5-GHz mode locking of a Nd: YLF laser [J]. *Opt Lett*, 1991, 16: 1502-1504.
- [33] Keller U, Miller D A B, Boyd G D, et al. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd: YLF lasers: An antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. *Opt Lett*, 1992, 17: 505-507.
- [34] Krainer L, Paschotta R, Lecomte S, et al. Compact Nd: YVO₄ lasers with pulse repetition rates up to 160 GHz [J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2002, 38: 1331-1338.
- [35] Bartels A, Dekorsy T, Kurz H. Femtosecond Ti: sapphire ring laser with a 2-GHz repetition rate and its application in time-resolved spectroscopy [J]. *Opt Lett*, 1999, 24: 996-998.
- [36] Fortier T M, Bartels A, Diddams S A. Octave-spanning Ti: sapphire laser with a repetition rate > 1 GHz for optical frequency measurements and comparisons [J]. *Opt Lett*, 2006, 31: 1011-1013.
- [37] Bartels A, Gebis R, Kirchner M S, et al. Spectrally resolved optical frequency comb from a self-referenced 5 GHz femtosecond laser [J]. *Opt Lett*, 2007, 32: 2553-2555.
- [38] Bartels A, Heinecke D, Diddams S A. 10-GHz self-referenced optical frequency comb [J]. *Science*, 2009, 326: 681-681.
- [39] Lezius M, Wilken T, Deutsch C, et al. Space-borne frequency comb metrology [J]. *Optica*, 2016, 3: 1381-1387.
- [40] Martinez A, Yamashita S. Multi-gigahertz repetition rate passively modelocked fiber lasers using carbon nanotubes [J]. *Opt Express*, 2011, 19(7): 6155-6163.
- [41] Murphy M T, Udem T, Holzwarth R, et al. High-precision wavelength calibration of astronomical spectrographs with laser frequency combs [J]. *Mon Not R Astron Soc*, 2007: 380.
- [42] Li C H, Benedick A J, Fendel P, et al. A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm s^{-1} [J]. *Nature*, 2008, 452: 610-612.
- [43] Steinmetz T, Wilken T, et al. Laser frequency combs for astronomical observations [J]. *Science*, 2008, 321: 1335.
- [44] Zhu Jiangfeng, Tian Wenlong, Gao Ziyue, et al. Diode pumped all-solid-state femtosecond Yb laser oscillator [J]. *Chinese Journal Lasers*, 2017, 44(9): 0900001. (in Chinese)
朱江峰, 田文龙, 高子叶, 等. 二极管抽运全固态飞秒Yb激光振荡器[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0900001.
- [45] Yamazoe S, Katou M, Kasamatsu T. Ultra-compact Laser-diode-pumped Femtosecond Solid-state Laser[Z/OL]. [2020-06-16] https://www.fujifilm.com/about/research/report/054/pdf/index/ff_rd054_009_en.pdf.
- [46] Yamazoe S, Katou M, Adachi T, et al. Palm-top-size, 1.5 kW peak-power, and femtosecond (160 fs) diode-pumped mode-locked Yb³⁺: KY (WO₄)₂ solid-state laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Opt Lett*, 2010, 35: 748-750.
- [47] Pekarek S, Fiebig C, Stumpf M C, et al. Diode-pumped gigahertz femtosecond Yb: KGW laser with a peak power of 3.9 kW [J]. *Opt Express*, 2010, 18: 16320-16326.
- [48] Pekarek S, Südmeyer T, Lecomte S, et al. Self-referenceable frequency comb from a gigahertz diode-pumped solid-state laser [J]. *Opt Express*, 2011, 19: 16491-16497.
- [49] Genty G, Coen S, Dudley J M. Fiber supercontinuum sources [J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24: 1771-1785.
- [50] Pekarek S, Stumpf M C, Lecomte S, et al. Compact gigahertz frequency comb generation: how short do the pulses need to be?[C]//ASSP Optical Society of America, 2012: AT5A. 2.
- [51] Pekarek S, Klenner A, Südmeyer T, et al. Femtosecond diode-pumped solid-state laser with a repetition rate of 4.8 GHz [J]. *Opt Express*, 2012, 20: 4248-4253.
- [52] Klenner A, Golling M, Keller U. A gigahertz multimode-diode-pumped Yb: KGW enables a strong frequency comb offset beat signal [J]. *Opt Express*, 2013, 21: 10351-10357.
- [53] Petit J, Goldner P, Viana B. Laser emission with low quantum defect in Yb: CaGdAlO₄ [J]. *Opt Lett*, 2005, 30: 1345-1347.
- [54] Klenner A, Golling M, Keller U. Compact gigahertz frequency combs[C]//ASSL Optical Society of America, 2013: Ath3A. 1.
- [55] Klenner A, Golling M, Keller U. High peak power gigahertz Yb: CALGO laser [J]. *Opt Express*, 2014, 22: 11884-11891.
- [56] Klenner A, Golling M, Keller U. Gigahertz diode-pumped Yb: CALGO laser with 60-fs pulses and an average output power of 3.5 W [C]//CLEO-Laser Science to Photonic Applications.

- IEEE, 2014: 1-2.
- [57] 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]. *Nat Commun*, 2017, 8: 1-8.
- [58] Waldburger D, Mayer A S, Alfieri C G E, et al. Tightly locked optical frequency comb from a semiconductor disk laser [J]. *Opt Express*, 2019, 27: 1786-1797.
- [59] 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]. *Opt Express*, 2020, 28: 12755-12770.
- [60] Wasylczyk P, Wnuk P, Radzewicz C. Passively modelocked, diode-pumped Yb: KYW femtosecond oscillator with 1 GHz repetition rate [J]. *Opt Express*, 2009, 17: 5630-5636.
- [61] Endo M, Ozawa A, Kobayashi Y. Kerr-lens mode-locked Yb: KYW laser at 3.3-GHz repetition rate[C]//CLEO Optical Society of America, 2012: CF3L. 2.
- [62] Kobayashi Y, Nomura Y, Watanabe S. 1.3-GHz, 20-W, femtosecond chirped-pulse amplifier system[C]//CLEO Optical Society of America, 2010: CMN3.
- [63] Endo M, Ozawa A, Kobayashi Y. Kerr-lens mode-locked Yb: KYW laser at 4.6-GHz repetition rate [J]. *Opt Express*, 2012, 20: 12181-12197.
- [64] Senatsky Y, Shirakawa A, Sato Y, et al. Nonlinear refractive index of ceramic laser media and perspectives of their usage in a high-power laser-driver [J]. *Laser Phys Lett*, 2004, 1: 500-506.
- [65] Yumashev K V, Posnov N N, Prokoshin P V, et al. Z-scan measurements of nonlinear refraction and Kerr-lens mode-locking with Yb³⁺: KY(WO₄)₂ [J]. *Opt Quant Electron*, 2000, 32: 43-48.
- [66] Endo M, Ozawa A, Sukegawa T, et al. 5.2-GHz, Kerr-lens mode-locked Yb: Lu₂O₃ ceramic laser for comb-resolved broadband spectroscopy. [C]//CLEO OSA Technical Digest (online), 2013: CTu11. 3.
- [67] Endo M, Ozawa A, Kobayashi Y. 6-GHz, Kerr-lens mode-locked Yb: Lu₂O₃ ceramic laser for comb-resolved broadband spectroscopy [J]. *Opt Lett*, 2013, 38: 4502-4505.
- [68] Endo M, Ito I, Kobayashi Y. Direct 15-GHz mode-spacing optical frequency comb with a Kerr-lens mode-locked Yb: Y₂O₃ ceramic laser [J]. *Opt Express*, 2015, 23: 1276-1282.
- [69] Kimura S, Tani S, Kobayashi Y. Kerr-lens mode locking above a 20 GHz repetition rate [J]. *Optica*, 2019, 6: 532-533.
- [70] Qing Z, Yanying Z, Zhiyi W. Sub-10 fs laser pulses with repetition rate of 1.1 GHz by a Ti: sapphire oscillator [J]. *Chinese Sci Bull*, 2009, 20: 3649-3652.
- [71] Li Chen, Ma Yuxuan, Gao Xiang, et al. 1 GHz repetition rate femtosecond Yb: fiber laser for direct generation of carrier-envelope offset frequency [J]. *Appl Optics*, 2015, 54(28): 8350-8353.
- [72] Wang Wenlong, Lin Wei, Cheng Huihui, et al. Gain-guided soliton: Scaling repetition rate of passively modelocked Yb-doped fiber lasers to 12.5 GHz [J]. *Opt Express*, 2019, 27(8): 10438-10448.
- [73] Major A, Nikolakakos I, Aitchison J S, et al. Characterization of the nonlinear refractive index of the laser crystal Yb: KGd(WO₄)₂ [J]. *Appl Phys B*, 2003, 77(4): 433-436.
- [74] McCracken R A, Charsley J M, Reid D T. A decade of astrocombs: recent advances in frequency combs for astronomy [J]. *Opt Express*, 2017, 25: 15058-15078.
- [75] InternationalTelecommunicationUnion.2015-09-12.IMTVision—Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. ITU-R, M2083-0[EB/OL]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf
- [76] Tomohiro I, Eilanlou A A, Yasuo N, et al. Kerr lens mode-locked Yb: Lu₂O₃ bulk ceramic oscillator pumped by a multimode laser diode [J]. *Jpn J Appl Phys.*, 2015, 54: 072703.
- [77] Tian W L, Yu C, Zhu J F, Zhang D C, et al. Diode-pumped high-power sub-100 fs Kerr-lens mode-locked Yb: CaYAlO₄ laser with 1.85 MW peak power [J]. *Opt Express*, 2019, 27: 21448-21454.