

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.04.01

GHz 重复频率固体飞秒激光技术进展 及应用前景

陈相森, 武腾飞

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 固体飞秒激光器以其体积小、成本低、使用寿命长、稳定性高、技术较为成熟等特点, 受到市场的广泛青睐。重复频率是飞秒激光器的一个重要参数, 在实际应用中, 高重复频率能带来高效率、高精度等诸多重要优势。本文介绍了 SESAM 锁模、KLM 锁模、高次谐波锁模等常用的 GHz 固体飞秒激光器锁模技术及发展情况, 阐述了 GHz 飞秒光源在激光加工、距离测量、光谱测量等应用场景中突出的性能优势, 并对 GHz 重复频率固体飞秒激光技术的发展方向进行了预测, 为推动 GHz 重复频率固体激光器技术的完善与提升提供借鉴。

关键词: 飞秒激光器; 吉赫兹重复频率; 固态激光器; 光纤激光器

中图分类号: TB9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)04-0001-09

Research progress and application prospect of GHz repetition frequency solid-state femtosecond laser technology

CHEN Xiangmiao, WU Tengfei

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Solid-state femtosecond lasers are widely favored by the market due to their small size, low cost, long service life, high stability, and relatively mature technology. Repetition frequency is an important parameter of femtosecond lasers. In practical applications, high repetition frequency can bring many important advantages such as high efficiency and high precision. This paper introduces the commonly used mode-locking technologies and development of GHz solid-state femtosecond lasers such as SESAM mode-locking, KLM mode-locking and high-order harmonic mode-locking, and expounds the performance advantages of GHz femtosecond light sources in application scenarios such as laser processing, distance measurement and spectrum measurement. It also predicts the development direction of GHz repetition rate solid-state femtosecond laser technology, and provides reference for promoting the improvement of GHz repetition rate solid-state laser technology.

Key words: femtosecond laser; gigahertz repetition rate; solid-state laser; fiber laser

0 引言

超快光学作为一门比较前沿的光学分支, 在近几年中获得了较快发展。20 世纪七十年代,

F. J. Mcclung 等人利用调 Q 的方法得到了 ns 量级的脉冲激光^[1], K. Gürs, R. Müller 等人提出了锁模技术^[2]。1985 年, D. Strick 等人提出啁啾脉冲放大技术^[3], 2001 年, M. Hentschel 等人利用飞秒激光

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2022-07-08

基金项目: 航空工业计量所创新基金(ZC02201580)

引用格式: 陈相森, 武腾飞. GHz 重复频率固体飞秒激光技术及应用[J]. 计测技术, 2022, 42 (4): 1-9.

Citation: CHEN X M, WU T F. GHz repetition frequency solid-state femtosecond laser technology[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (4) :1-9.



作用于惰性气体产生高次谐波, 获得了脉冲宽度为 650 as 的激光脉冲^[4]。超快激光器作为推动超快光学发展的核心, 得到了重点关注与研究。相较目前以实验室应用为主的阿秒激光器^[5], 飞秒激光器更为成熟, 应用范围更广泛, 更加接近替代市场上主要销售的 ns, ps 激光器, 在激光加工^[6]、激光测距^[7]、生物成像^[8]、光谱测量^[9]、光通信^[10]等领域有着重要的应用价值。

吉赫兹 (GHz) 飞秒激光器相较一般的千赫兹 (kHz)、兆赫兹 (MHz) 飞秒激光器具有更为突出的性能特点, 在实际应用中, 具有更高的效率以及精度。本文首先介绍了固体飞秒激光器产生 GHz 脉冲方法的国内外发展情况, 之后介绍了飞秒激光常用的应用场景, 分析并探讨了 GHz 飞秒激光器独有的技术优势, 最后对 GHz 固体飞秒激光技术未来发展方向进行展望。

1 GHz 固体飞秒激光器的发展情况

根据增益介质的种类不同, 激光器可分为气体激光器、染料激光器、半导体激光器和固体激光器。气体激光器和染料激光器由于体积大、寿命短、不稳定、安全性较低等缺点, 已经逐渐退出了主流的研究方向。半导体激光器虽然集成化程度高, 可以实现小型化, 但是由于半导体激光器利用高浓度载流子发光, 其输出光容易受到电流波动和温度的影响, 光束质量相对较差。相较而言, 固体激光器有着体积较小、寿命长、光束质量好、抗干扰能力强等优点。固体激光器可分为使用晶体介质的固态激光器和使用光纤介质的光纤激光器。

1.1 GHz 全固态激光器的发展情况

全固态激光器最为常用的飞秒脉冲产生技术有基于半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的被动锁模技术和克尔透镜 (KLM) 锁模技术。

1.1.1 SESAM 锁模技术

SESAM 由瑞士苏黎世联邦理工学院 U. Keller 发明, 并于 1992 年首次使用它在全固态振荡器中实现了稳定的被动锁模^[11]。基于光入射到可饱和吸收体的光强增加而吸收降低的吸收漂白效应, 将半导体可饱和吸收体与反射镜集成起来, 就得到了随着入射光强提高, 反射率增大的半导体可

饱和吸收镜 (SESAM)。在激光锁模的过程中, SESAM 对谐振腔内的激光进行了振幅调制, 入射强度较低的光会产生较大损耗, 而入射强度较高的光则几乎无损地被反射, 使得激光整体在谐振腔中循环时, 光强较高的光不断增强, 直到射出振荡器, 而光强较弱的光在循环中不断变弱, 最后被损耗掉, 以此形成超短脉冲。但是由于增益介质的发射带宽和谐振腔内震荡补偿问题, 在 SESAM 锁模技术提出的前十几年, 得到的激光脉冲均为皮秒量级。2010 年, 日本富士胶片公司的 S. Yamazoe 等人报道了通过 SESAM 被动锁模技术使用 $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ 得到中心波长为 1045 nm, 平均功率为 680 mw, 单脉冲峰值功率为 1.5 kW, 重复频率为 2.8 GHz 的飞秒脉冲^[12]。同年瑞士联邦理工学院 U. Keller 课题组的 Selina Pekarek 等人通过锥形分布式布拉格二极管激光器泵浦 $\text{Yb}:\text{KGW}$ 晶体得到了平均功率 1.1 W, 脉冲宽度为 281 fs 的孤子脉冲, 并通过增加泵浦功率, 观察到了 2, 3, 4 GHz 的谐波锁模状态^[13]。2012 年, Selina Pekarek 等人又在之前工作的基础上, 通过泵浦 $\text{Yb}:\text{KGW}$ 晶体, 得到了重复频率为 4.8 GHz, 脉冲宽度为 396 fs, 平均功率 1.9 W, 峰值功率 0.9 kW 的飞秒脉冲^[14]。2014 年, U. Keller 课题组换用另一种掺镱晶体 $\text{Yb}:\text{CALGO}$ 得到了脉冲宽度小于 60 fs, 重复频率 1.8 GHz, 平均功率为 2.95 W 的飞秒脉冲^[15]。同年, 韩国科学技术院的 Hee-Won Yang 等人, 基于可饱和吸收镜的原理, 制造了一种碳纳米管可饱和吸收镜, 并通过泵浦 $\text{Yb}:\text{KYW}$ 晶体, 得到了重复频率 1.2 GHz, 脉冲宽度 168 fs, 中心波长 1047 nm 的飞秒脉冲输出^[16]。2017 年, 瑞士联邦理工学院 U. Keller 团队的 A. S. Mayer 等人报道了通过泵浦 $\text{Yn}:\text{CaGdAlO}_4$ 晶体, 获得重复频率 10.6 GHz, 平均输出功率 1.2 W, 脉冲宽度 166 fs 的飞秒脉冲, 自此将 SESAM 锁模技术可获得的飞秒脉冲重复频率提高到了 10 GHz 量级^[17]。2021 年, 同一课题组的 Ajan Barh 等人基于 SESAM 被动锁模, 通过使用 InGaSb/GaSb 的 SESAM 和泵浦 Cr^{2+} 掺杂的 ZnS 晶体得到了脉冲宽度为 155 fs, 中心波长为 2380 nm, 平均功率 0.8 W 的中红外 GHz 全固态激光器^[18]。Ajan Barh 等人的工作, 拓展了 SESAM 被动锁模技术在 GHz 中红外

激光器中的应用。

国内相关领域的课题组在 GHz 固态激光器方面的研究还有所欠缺,已有的研究多集中于 GHz 飞秒光纤激光器。

1.1.2 KLM 锁模技术

KLM 锁模技术在 1990 年由 D. E. Spence 等人发现,由于当时的实验系统中没有任何控制锁模的器件,就能实现自主锁模^[19],所以一开始又被称为自锁模。后来研究人员发现钛宝石晶体能够发生克尔效应,并且由此产生类似透镜的非线性效应,因此这种锁模方式被命名为克尔透镜锁模。光克尔效应的原理是各向同性的介质,在强光照的条件下,会表现出双折射的特性,具体可表示为

$$\tilde{n}_{x,y} = n_{x,y} + n_2 I(t,r) \quad (1)$$

式中: $\tilde{n}_{x,y}$ 为克尔介质的折射率; $n_{x,y}$ 为介质的线性折射率; n_2 为介质的非线性折射率系数; $I(t,r)$ 为通过介质的光强度,与时间 t 和空间 r 有关。

由于一般激光的能量分布多为高斯分布,根据式(1),光束中心和边缘在经过介质时会产生不同的色散,从而发生自聚焦效应,产生脉冲宽度较窄的超短脉冲。

2001 年,卡尔斯鲁厄大学的 R. Ell 等人利用 KLM 锁模的钛宝石激光器获得了脉冲宽度为 5 fs,重复频率 65 MHz,平均功率为 120 mW,光谱范围覆盖 600~1200 nm 的飞秒脉冲^[20],其在之后的数年中都是飞秒脉冲宽度的世界纪录保持者。2009 年,华沙大学的 P. Wasylczyk 等人利用 Yb: KWF 晶体首先获得了重复频率 1.0138 GHz,脉冲宽度 200 fs,中心波长 1047 nm 的飞秒激光脉冲^[21],由此开启了基于克尔透镜锁模的全固态飞秒激光器的 GHz 时代。因为 KLM 锁模的腔内结构较少,且克尔效应只有在光强满足一定条件时才能实现,所以对于谐振腔内的条件要求较高。2012 年,日本东京大学的 Mamoru Endo 等人将反射镜镀膜以提高谐振腔内的功率,使得腔内功率满足通过克尔效应产生高重复频率脉冲的功率要求,通过 750 mW 的泵浦功率得到了重复频率为 3.3 GHz,输出功率 13.5 mW,脉冲宽度 150 fs 的飞秒脉冲^[22]。同年 Mamoru Endo 团队基于之前的工作得到了重复频率 4.6 GHz,输出功率为 14.6 mW,中心波长为 1046 nm,

脉冲宽度 146 fs 的飞秒脉冲^[23],并记录了实验中不同泵浦功率下,输出脉冲的锁模状态和输出功率。同年,芬兰赫尔辛基大学的 Markku Vainio 等人利用克尔透镜锁模,泵浦钛蓝宝石,得到了重复频率 1 GHz,中心波长 1.6 μm ,频谱范围 85 nm,长期运行的平均输出功率大于 100 mW 的飞秒光学参量振荡器^[24]。2013 年,Mamoru Endo 团队制作了一个克尔透镜锁模 Yb: Lu₂O₃ 陶瓷激光器,得到了 5.2 GHz 的锁模脉冲,并通过自制的大型透射光栅开发了一台高分辨力光谱仪,清晰地观察到了锁模脉冲频谱上每个纵模所对应的梳齿^[25]。2015 年,Mamoru Endo 团队又在之前工作的基础上,得到了重复频率 15 GHz,脉冲宽度 152 fs 的脉冲输出,在泵浦功率为 1.1 W 时,最大输出功率可达 60 mW^[26]。2016 年,伯明翰大学的 Sergey Vasilyev 等人利用 KLM 锁模技术,通过掺铒激光器泵浦 Cr: ZnS 晶体,得到了重复频率最高 1.2 GHz,脉冲宽度 50 fs,中心波长为 2.4 μm 的中红外飞秒脉冲输出^[27],并在 1 GHz 时获得了 1.2 W 的输出功率。2019 年,东京大学的 Shota Kimura 等人改进了常用的四器件 8 字形谐振腔,通过一种新的三器件腔体结构(如图 1 所示),得到了最高达到 23.8 GHz 的飞秒脉冲输出^[28],这种新的腔体结构突破了由于光学元件尺寸和腔体优化精度限制而使四器件谐振腔无法获得 20 GHz 重复频率输出脉冲的瓶颈。但是受限于腔内器件的尺寸问题,全固态激光器的重复频率至此到达了一个新的瓶颈,很难进一步提高。

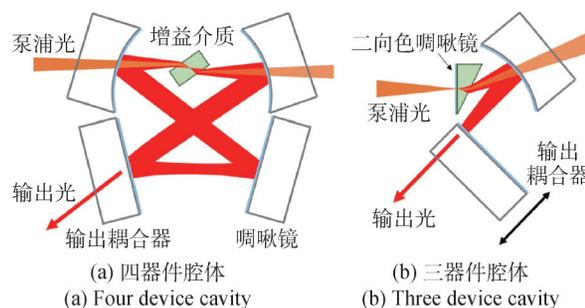


图1 两种谐振腔示意图^[28]

Fig.1 Schematic diagram of two resonators^[28]

国内关于 KLM 锁模技术最早的报道是 2009 年中科院物理所的张青等人使用 532 nm 的激光泵浦钛宝石,获得了重复频率 1.1 GHz,输出功率为 30 mW,脉冲宽度小于 10 fs,光谱范围覆盖 670~

920 nm的脉冲输出^[29]。2021年,西安电子科技大学的郑立等人通过光纤激光器泵浦 Yb: KGW 晶体,获得了 2 GHz 的激光脉冲,在平均输出功率为 1.7 W 的情况下,脉冲宽度为 145 fs^[30],这是至今为止,利用 KLM 锁模 GHz 重复频率全固态激光器所能得到的最高功率。

1.2 GHz 光纤激光器的发展情况

SESAM 锁模技术不但在全固态激光器中有着广泛的应用,在光纤激光器中也是一种主流的脉冲生成技术。2005年,东京大学的 S. Yamashita 等人利用碳纳米管可饱和吸收体在 1550 nm 波段得到了重复频率 5.18 GHz,脉冲宽度为 680 fs 的飞秒脉冲^[31]。2011年,该课题组的 A Martinez 和 S Yamashita 利用碳纳米管可饱和吸收体获得了中心波长为 1563 nm,重复频率为 19.45 GHz,脉冲宽度为 790 fs 的脉冲输出,该重复频率为至今为止飞秒可饱和吸收体光纤激光器所能得到的最高重复频率^[32]。2013年,英国圣安德鲁斯大学的 A A Lagatsky 等人利用半导体可饱和吸收镜搭建了一台中心波长为 1050 nm,脉冲宽度 811 fs,重复频率最高可达 15 GHz 的掺镱光纤激光器^[33]。

国内研究团队在 SESAM 锁模的 GHz 光纤飞秒激光器的研究领域建树颇丰。2019年,中科院西光所的王虎山等人报道了一种利用 SESAM 锁模的低噪声掺铒飞秒激光器,能够输出重复频率 2.68 GHz,脉冲宽度 244 fs 的飞秒脉冲,从 30 MHz~300 Hz 的时间抖动为 82.5 fs^[34]。2021年,杨中民课题组报道了利用 SESAM 锁模技术搭建的全光纤激光器,在 1.5 μm 的中心波长下,重复频率 4.9 GHz,脉冲宽度 63 fs,平均输出功率 10 W^[35]。2022年,华南理工大学杨中民课题组的王伟超等人使用铒镱共掺光纤,通过搭建 SESAM 锁模的全光纤激光器在泵浦功率仅为 90 mW 的情况下,得到了重复频率 1.6 GHz,脉冲宽度为 390 fs 的飞秒脉冲输出^[36]。同年,同一课题组的梁兆恒等人,展示了一种飞秒掺铒光纤激光器,利用 SESAM 锁模技术获得了 2 μm 波段下,重复频率 11.3 GHz,平均功率 612 mW 的中红外飞秒脉冲,这是在该波段下目前所能得到的最高重复频率^[37]。

由于光纤独有的一些非线性特点,相关领域的研究人员开发出了独属于光纤激光器的几种锁

模方式:非线性偏振旋转锁模(NPR)、高次谐波锁模、非线性放大环形镜锁模(NALM)等,由于 NALM 需要一定长度的光纤积累非线性相移,故至今为止利用 NALM 技术所得到的飞秒脉冲的重复频率最高只有 700 MHz^[38]。下面主要介绍 NPR 锁模和高次谐波锁模。

非线性偏振旋转锁模是光纤激光器中很常用的一种锁模方式,其原理是:利用偏振分光棱镜和二分之一、四分之一波片一起组成带有偏振选择功能的系统,该系统将自由运转的普通激光在偏振分光棱镜处转变为线偏光,之后经过波片转变为椭圆偏振光。由于单模光纤具有的非线性效应,当谐振腔内的光强达到一定值时,会积累与光强相关的非线性相移,导致脉冲中不同位置处由于光强的不同而在相互正交的偏振方向上产生不同的非线性相移,因此改变了偏振态。根据上述原理,通过调节波片,选择脉冲中心所对应的偏振态,将边缘部分滤掉,以此压缩脉冲获得超短脉冲。但是由于 NPR 锁模利用的是单模光纤的双折射效应,极易受到震动的影响导致失锁,故 NPR 技术目前仍处于实验室研究阶段,很少获得实际工程应用,并且 NPR 技术的脉冲重复频率受限于光纤长度,如果光纤长度较长则无法得到较高的重复频率,如果光纤长度较短则会出现散热问题,烧坏光纤。因此,通过 NPR 技术产生的激光很少直接达到 GHz 的重复频率,而是基于 NPR 锁模产生的脉冲噪声较低、质量较好的特点,将 NPR 技术产生的脉冲作为高次谐波锁模的基频光来获得 GHz 重复频率的飞秒脉冲。

高次谐波锁模更容易获得更高的重复频率。在泵浦功率较高,达到一定限度的情况下,激光器的谐振腔内的脉冲不会无限制地提高峰值,而是会分裂产生多个孤子脉冲。这些孤子脉冲在稳定的情况下有着相同的脉冲特性,当相互分离时,还会具有相同的脉冲能量和脉冲宽度^[39]。根据这种原理,通过调整谐振腔的偏振态,使得谐振腔内分裂的孤子脉冲产生相同的时间间隔,从而提高激光器输出脉冲的重复频率。利用谐波锁模比较容易获得高重复频率的脉冲激光,但是得到的脉冲的幅度均匀性较差,且在时域上会有较大的抖动^[40]。2006年康奈尔大学的周士安等人利用掺

镜光纤激光器, 基于 NPR 技术在 31 次谐波下得到了重复频率为 1.3 GHz, 单脉冲能量小于 100 pJ, 脉冲宽度为 500 fs 的激光脉冲, 但却有着 6 ps 的时间抖动^[41]。2013 年, 勃艮第大学的 Lecaplain 等人利用无源谐波锁模在最高 928 次谐波下获得了 22.2 GHz 重复频率的脉冲输出, 而在最稳定的第 272 次谐波下, 有着 6.52 GHz 的重复频率和 2.3 ps 的时间抖动^[42]。2015 年, 西安电子科技大学的田文龙等人利用 75.57 MHz 掺镱飞秒激光器同步泵浦的飞秒光学参量振荡器在 18211 次谐波下获得了创纪录的 1.37 THz 重复频率, 此时的脉冲宽度为 138 fs, 并且在 2 W 的泵浦功率下能获得 175 mW 的平均功率输出^[43]。

除了以上各种通过谐振腔直接输出飞秒脉冲的技术外, 还可以通过将谐振腔输出的光在腔外进行模式滤波, 过滤掉输入光的一部分频率成分, 从而得到高重复频率的锁模飞秒脉冲。2017 年, 中科院国家授时中心的陈茂强通过腔外滤波的方式, 将飞秒脉冲的重复频率从 207 MHz 提高到 4.77 GHz^[44]。但是这种方法存在两点缺陷: 其一, 若系统设置的滤波线宽过宽, 则可能无法过滤掉一些本该滤掉的相邻的纵模, 导致产生边模泄露问题; 其二, 激光在装置内传输的过程中会发生色散, 使得纵模之间的间隔发生变化, 而使应该透过的纵模发生偏移^[45]。

2 GHz 飞秒激光技术的应用

固体激光器具有成本低、体积小、可靠性高、寿命长、相关产业较为成熟等优点, 有着巨大的市场需求和应用潜力。在激光加工中, 超短脉冲由于作用时间短, 使得激光在材料内部形成的热扩散面积小, 能够精确地对材料进行加工^[46]。1995 年, 密歇根大学的 P. P. Pronko 等人使用脉冲宽度 200 fs, 中心波长 800 nm 的钛宝石激光器加工出了一个直径 300 nm, 深 52 nm 的小孔^[47], 由此开启了飞秒激光加工的时代。2003 年, Rizvi N H 整理了飞秒激光对于金属、玻璃、金刚石、各类聚合物、陶瓷等材料的微加工技术进展, 并比较了飞秒激光加工与相似作用的竞争方案之间的优势和潜力^[48]。重复频率为 kHz 或者 MHz 量级的超快激光器由于加工速度较慢, 不符合一些对加工

速度有要求的生产场合, 且单纯提升激光器的输出功率会使得热扩散面积增大, 损伤加工材料, 降低加工精度, 并且当重复频率较低时, 由于相邻脉冲之间的时间间隔较大, 在加工中受热的加工点会有更多的时间将热量扩散到相接触周围材料, 导致热扩散面积增大, 加大热损伤范围。而使用重复频率为 GHz 的超快激光器能够有效避免上述问题。2016 年, 土耳其比尔肯特大学的 Can Kerse 等人通过提高飞秒激光器的重复频率, 利用烧蚀冷却机制减小激光加工中对于目标周围的热扩散影响, 并使用 1.7 GHz 的飞秒激光器分别去除牙质和小鼠的脑组织, 结果表明, 相较低重复频率的飞秒激光器, GHz 飞秒激光器在加工中产生的热损伤小了很多, 并且加工速率提高了数倍^[49]。2020 年, 法国 Amplitude Systèmes 公司的 Guillaume Bonamis 等人基于 Can Kerse 等人之前的工作, 分别使用 0.88, 1.76, 3.52 GHz 的飞秒激光器, 改变不同的激光功率和脉冲串发射时间, 探究对于几种不同金属和非金属的烧蚀效率和加工质量, 发现对于不同的金属, 在其他条件不变的情况下, 通过选择对应的激光重复频率和脉冲串发射时间, 能够得到最高的烧蚀效率和良好的加工质量^[50]。

由于飞秒脉冲的脉冲宽度较短, 小于现有的任何电子器件的时间分辨力 (ps 量级), 并且电子系统的时间抖动也会掩盖飞秒量级的光脉冲带来的高速响应的高精度优势, 为了解决上述问题, 研究人员将飞秒激光器扩谱锁定制作成飞秒光梳, 利用光梳的超稳和宽光谱特性进行距离测量。高重复频率的飞秒激光器对于飞秒光梳测距也具有重要意义, 在飞秒光学频率梳中, 重复频率在频域中表示光梳频域中相邻两个梳齿之间的间隔, 在时域中, 重复频率的倒数表示飞秒激光器的发射周期。提高重复频率能够增大激光器频域中相邻梳齿间的间隔, 防止频谱混叠影响测距精度。当光梳的重复频率一定时, 单纯地增大双梳间差频的值, 会导致系统的等效采样率降低, 影响干涉信号的恢复。清华大学吴冠豪团队对此开展了相关研究^[51], 并对结果进行了分析 (如图 2 所示), 得出重复频率一定时, 存在一个差频的最优取值, 使得此时得到的测量精度最高, 这个最优

解仅受到光梳重复频率的影响。在一些对测距要求比较高的应用场景中,若使用 MHz 或 kHz 飞秒光梳会存在精度和测量速度不能完全兼顾的问题,而使用 GHz 飞秒激光器则能够有效避免该问题,通过提高激光器的重复频率,增大精度最高时对应的差频的最优解,从而在提高测量速度的同时保持很高的测量精度。

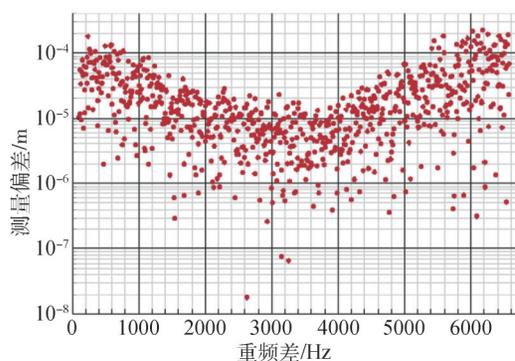


图2 56 MHz 重复频率光梳的重复频率差最优区间分析^[51]
Fig.2 Optimal solution analysis of repetition frequency difference of 56 MHz repetition frequency optical comb

GHz 飞秒激光在光谱测量领域也有其独特的优势。对于常用于燃烧诊断领域的飞秒激光诱导荧光技术和飞秒成丝诱导非线性光谱技术,使用重复频率更高的激光器能得到更快的测量速度,对于某些需要进行高速测量的应用场景有着重要的价值^[52]。而对于各种单、双飞秒光梳光谱测量技术,使用的激光器重复频率达到 GHz 量级后,在频域上梳齿状的纵模会分离,并且以梳齿线宽的分辨力进行宽光谱测量。将频率梳应用于高精度分子光谱时,模式间距应大于热多普勒展宽。例如,在室温下,氢分子在 1000 nm 跃迁时的多普勒展宽约为 3 GHz,此时需要使用重复频率大于 3 GHz 的飞秒激光器进行光谱测量^[34]。在天文应用中,多普勒速度漂移的精确测量是研究宇宙膨胀历史和寻找太阳系外行星的重要课题。使用多 GHz 飞秒锁模激光器作为天文光谱仪的校准器,可以减少所需滤波腔的数量,以获得足够大的模间距,并使得整个系统更加可靠,在天文台有限的实验环境下也更容易操作,且由于飞秒光梳的超稳特性,即使激光器进行长时间工作,也能保证激光器的纵模波动在 mHz 量级甚至更低^[53]。

3 总结与展望

GHz 固体飞秒激光器在国际上已经取得了非常杰出的研究进展,但是目前也发展到了接近瓶颈的水平。对于高重频所带来的高噪声的问题,北大张志刚教授课题组最近报道的一种硅基光梳,将业内普遍认为的高重频会带来更高噪声问题归因于机械噪声,并通过玻璃结构搭建了一套 GHz 飞秒光纤激光器,得到了非常优秀的结果^[54]。而根据重复频率 f_r 的计算公式 $f_r = \frac{c}{2L}$ (c 为光速; L 为谐振腔的光学长度),可知想要提高重复频率就必然要缩短腔长。

对于光纤激光器,以光纤的折射率为 1.5 计算,若要实现 20 GHz 的重复频率,则需要的腔长为 5 mm。由于光纤激光器的腔长过短,使得增益光纤无法完全将泵浦光吸收,由此带来的严重的散热问题可能会导致光纤被烧坏。并且产生高重复频率脉冲所需要的增益光纤的高掺杂浓度也很难进一步提升,这也限制了飞秒光纤激光器重复频率的提高。

对于全固态飞秒激光器,其谐振腔内的晶体和各种器件受限于制作工艺,在达到一定尺寸后很难进一步缩小,使得研究人员很难继续提高重复频率。虽然单纯的飞秒固体激光技术很难再提升重复频率,但是随着半导体技术的发展,光泵浦垂直外腔面发射锁模半导体激光器(VECSEL)等将半导体技术与固体激光技术相结合的手段更容易获得较高的重复频率。2006年,苏黎世联邦理工学院的 Aschwenden 等人利用 VECSEL 技术搭建了输出 50 GHz 的皮秒激光器^[55],同组的 Oliver D 等人在 2011 年利用 VECSEL 技术做出了最高可达 11.3 GHz 重复频率的飞秒激光器^[56]。由于半导体技术高集成性的特点,利用此技术有着得到 100 GHz 重复频率脉冲输出的潜力。虽然单纯的 GHz 飞秒激光器在提升重复频率的方向陷入了一个瓶颈,但类似 VECSEL 这种结合半导体技术的飞秒固体激光器还有着很大的潜力供研究人员挖掘。

参考文献

- [1] MCCLUNG F J, HELLWARTH R W. Giant optical pulsations from ruby[J]. Journal of applied physics, 1962,

- 33(3): 103-105.
- [2] GÜRS K, MÜLLER R. Breitband - modulation durch steuerung der emission eines optischen masers (Auskoppelmodulation) [J]. Physics letter, 1963, 5 (3) : 179-181.
- [3] STRICKLAND D, MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics communications, 1985, 55(3): 219-221.
- [4] HENTSCHEL M, KIENBERGER R, SPIELMANN C, et al. Attosecond metrology [J]. Nature, 2001, 414 (6863): 509-513.
- [5] 魏志义, 钟诗阳, 贺新奎, 等. 阿秒光学进展及发展趋势[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 501001.
WEI Z Y, ZHONG S Y, HE X K, et al. Progress and trends in attosecond optics [J]. Chinese journal of lasers, 2021, 48(5): 501001. (in Chinese)
- [6] 刘雨晴, 孙洪波. 非线性激光制造的进展与应用[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 188-202.
LIU Y Q, SUN H B. Progress and application of nonlinear laser manufacturing[J]. Infrared and laser engineering, 2022, 51(1): 188-202. (in Chinese)
- [7] 武腾飞, 梁志国, 严家骅, 等. 飞秒光学频率梳测距技术的研究进展[J]. 计测技术, 2011, 31(5) : 41-44.
WU T F, LIANG Z G, YAN J H, et al. The progress on distance measuring technique with a femtosecond optical frequency comb[J]. Metrology and measurement technology, 2011, 31(5): 41-44. (in Chinese)
- [8] JI N, MAGEE J C, BETZIG E. High-speed low-photo-damage nonlinear imaging using passive pulse splitters [J]. Nature methods, 2008, 5(2): 197-202.
- [9] 吴柯岩, 任忠国, 苏容波, 等. 双飞秒激光脉冲诱导击穿光谱增强特性研究[J]. 强激光与离子束, 2016, 28(8): 41-45.
WU K Y, REN Z G, SU R B, et al. Enhanced laser-induced breakdown spectroscopy on co sample with double femtosecond laser pulses [J]. High power laser and particle beams, 2016, 28(8): 41-45. (in Chinese)
- [10] SARDESAI H P, CHANG C C, WEINER A M. A femtosecond code-division multiple-access communication system test bed [J]. Journal of light wave technology, 1998, 16(11): 1953-1964.
- [11] KEKKER U, MILLER D A, BOYD G D. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd: YLF laser: an antiresonant semiconductor fabry-perot saturable absorber[J]. Optics letters, 1992, 17(7): 505-507.
- [12] 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]. Optics letters, 2010, 35(5): 748-750.
- [13] 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]. Optics express, 2010, 18 (16): 16320-16326.
- [14] SELINA P, ALEXANDER K, THOMAS S, et al. Femtosecond diode-pumped solid-state laser with a repetition rate of 4.8 GHz [J]. Optics express, 2012, 20(4) : 4248-4253.
- [15] KLENNER A, GOLLING M, KELLER U. High peak power gigahertz Yb: CALGO laser [J]. Optics express, 2014, 22: 11884-11891.
- [16] YANG H W, KIM C, SUN Y C. 1.2 GHz repetition rate, diode-pumped femtosecond Yb: KYW laser mode-locked by a carbon nanotube saturable absorber mirror [J]. Optics express, 2012, 20(28): 29518-29523.
- [17] 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: 1-8.
- [18] BARH A, ALAYDIN B Ö, HEIDRICH J, et al. Two gigahertz femtosecond Cr: ZnS oscillator at 2.4 μm with 0.8 W average output power[C]// CLEO OSA Technical Digest, 2021: SF1B. 4.
- [19] 王专. 克尔透镜锁模飞秒钛宝石激光器前沿技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
WANG Z. Study on the frontier techniques of kerr lens mode locked ti: sapphire laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [20] ELL R, MORGNER U, KÄRTNER F X, et al. Generation of 5 fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti: sapphire laser[J]. Optics letters, 2001, 26 (6): 373-375.
- [21] WASYLICZYK P, WNUK P, RADZEWICZ C. Passively modelocked, diode-pumped Yb: KYW femtosecond oscillator with 1 GHz repetition rate [J]. Optics express, 2009, 17: 5630-5636.
- [22] 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.

- [23] 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.
- [24] VAINIO M, MERIMAA M, HALONEN L, et al. Degenerate 1 GHz repetition rate femtosecond optical parametric oscillator [J]. *Optics letters*, 2012, 37(21): 4561–4563.
- [25] 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.
- [26] 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]. *Optics express*, 2015, 23(2): 1276–1282.
- [27] SERGEY V, IGOR M, MIKE M. Kerr-lens mode-locked middle ir polycrystalline Cr: ZnS laser with a repetition rate 1.2 GHz [C]// Lasers Congress 2016, 2016: AW1A. 2.
- [28] SHOTA K, SHUNTARO T, YOHEI K. Kerr-lens mode locking above a 20 GHz repetition rate [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 532–533.
- [29] ZHANG Q, ZHAO Y Y, WEI Z Y. Sub-10 fs laser pulses with repetition rate of 1.1 GHz by a Ti: sapphire oscillator [J]. *Chinese science bulletin*, 2009, 54: 3649.
- [30] ZHENG L, TIAN W L, LIU H. 2 GHz watt-level kerr-lens mode-locked Yb: KGW laser [J]. *Optics express*, 2021, 29(9): 12950–12957.
- [31] YAMASHITA S, INOUE Y, HSU K, et al. 5 GHz pulsed fiber fabry-pe/spl acute/rot laser mode-locked using carbon nanotubes [J]. *IEEE photonics technology letters*, 2005, 17(4): 750–752.
- [32] MARTINEZ A, YAMASHITA S. Multi-gigahertz repetition rate passively modelocked fiber lasers using carbon nanotubes [J]. *Optics express*, 2011, 19(7): 6155–6163.
- [33] LAGATSKY A A, CHOUDHARY A, KANNAN P, et al. Fundamentally mode-locked, femtosecond waveguide oscillators with multi-gigahertz repetition frequencies up to 15 GHz [J]. *Optics express*, 2013, 21(17): 19608–19614.
- [34] SONG J Z, WANG H S, HUANG X N, et al. Compact low-noise passively mode-locked Er-doped femtosecond all-fiber laser with 2.68 GHz fundamental repetition rate [J]. *Applied optics*, 2019, 58(7): 1733–1738.
- [35] CHEN X W, LIN W, WANG W L, et al. High-power femtosecond all-fiber laser system at 1.5 μm with a fundamental repetition rate of 4.9 GHz [J]. *Optics letters*, 2021, 46(8): 1872–1875.
- [36] XIAO Y B, KUANG L D, HU X, et al. All-fiber mode-locked gigahertz femtosecond laser at 1610 nm using a self-developed long-wavelength gain fiber [J]. *Optics letters*, 2022, 47(4): 981–984.
- [37] LIANG Z H, LIN W, WU J F, et al. >10 GHz femtosecond fiber laser system at 2.0 μm [J]. *Optics letters*, 2022, 47(7): 1867–1870.
- [38] LIU G Y, JIANG X H, WANG A M, et al. Single-polarization large-mode-area fiber laser mode-locked with a nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optics letters*, 2018, 43(12): 2848–2851.
- [39] TANG D Y, ZHAO L M, ZHAO B, et al. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers [J]. *Physical review a*, 2005, 72(4): 43816.
- [40] 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. (in Chinese)
- [41] ZHOU S A, OUZOUNOV D G, WISE F W. Passive harmonic mode-locking of a soliton Yb fiber laser at repetition rates to 1.5 GHz [J]. *Optics letters*, 2006, 31(8): 1041–1043.
- [42] LECAPLAIN C, GRELU P. Multi-gigahertz repetition-rate selectable passive harmonic mode locking of a fiber laser [J]. *Optics express*, 2013, 21(9): 10897–10902.
- [43] TIAN W L, WANG Z H, ZHU J F, et al. Ultrahigh-repetition-rate femtosecond optical parametric oscillator [C]// ASSL OSA Technical Digest, 2015: AM5A. 29.
- [44] 陈茂强. 掺铒光纤光梳 4.77 GHz 模式滤波实验研究 [D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2017.
- CHEN M Q. Experimental studies on a 4.77 GHz mode-filter of an erbium-doped fiber comb [D]. Xi'an: National Time Service Center, 2017. (in Chinese)
- [45] 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 [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 [J]. *Infrared and laser engineering*, 2020, 49(12): 20201069. (in Chinese)
- [46] 倪晓昌, 王清月. 飞秒、皮秒激光烧蚀金属表面的有限差分热分析[J]. *中国激光*, 2004, 31(3): 277-280.
- NI X C, WANG Q Y. Finite difference method for thermal analysis of femtosecond-picosecond pulse laser ablation on metal surface [J]. *Chinese journal of lasers*, 2004, 31(3): 277-280. (in Chinese)
- [47] PRONKO P P, DUTTA S K, SQUIER J, et al. Machining of sub-micron holes using a femtosecond laser at 800 nm[J]. *Optics communications*, 1995, 114: 106-110.
- [48] RIZVI N H. Femtosecond laser micromachining: current status and applications [J]. *Riken review*, 2003, 50: 107-112.
- [49] KERSE C, KALAYCIOĞLU H, ELAHI P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [50] BONAMIS G, AUDOUARD E, HÖNNINGER C, et al. Systematic study of laser ablation with GHz bursts of femtosecond pulses [J]. *Optics express*, 2020, 28(19): 27702-27714.
- [51] 吴冠豪, 周思宇, 杨越棠. 双光梳测距及其应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 244-261.
- WU G H, ZHOU S Y, YANG Y T. Dual-comb ranging and its applications[J]. *Chinese journal of lasers*, 2021, 48(15): 1504002. (in Chinese)
- [52] 张大源, 李博, 高强, 等. 飞秒激光光谱技术在燃烧领域的应用[J]. *实验流体力学*, 2018, 32(1): 1-10.
- ZHANG D Y, LI B, GAO Q, et al. Application of femtosecond-laser spectrum technology in combustion field [J]. *Journal of experiments in fluid mechanics*, 2018, 32(1): 1-10. (in Chinese)
- [53] PROBST R A, MILAKOVIĆ D, PADRÓN B T, et al. A crucial test for astronomical spectrograph calibration with frequency combs [J]. *Nature astronomy*, 2020, 4: 603-608.

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 陈相森(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为飞秒激光测量。



通讯作者: 武腾飞(1983—), 男, 博士, 研究员。主要从事超快激光精密测量技术的研究。