

高重复频率飞秒光纤激光技术进展

袁帅¹, 于涵¹, 邹驰炫¹, 陈俊宇¹, 陈嘉宁¹, 闫明²

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 华东师范大学 精密光谱科学
国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 为解决高重复频率飞秒光纤激光器基本重复频率较低, 输出脉冲宽度较宽等问题, 对高重复频率光纤超短脉冲激光器的主要发展方向及面临的瓶颈展开研究。详细阐述了 SESAM 锁模、NPR 锁模、NALM 锁模等常用高重复频率飞秒光纤激光器锁模技术及发展现状, 并讨论了当前高重复频率飞秒光纤激光领域的难点与科技问题。在此基础上, 总结了以下领域的最新研究进展, 包括新型高重复频率锁模技术的探索、高重复频率光纤飞秒激光在输出波长方面的拓展, 以及超高稳定性高重复频率光纤光梳研究。最后, 简述了 GHz 飞秒光源在光丝激光雷达、光学频率梳以及生物探测等领域的典型应用, 并对其前景进行展望。

关键词: 超快激光; 激光谐振腔; 光纤激光器; 非线性光学; 光纤

中图分类号: O 436 **文献标志码:** A

Progress in femtosecond fiber laser technology with high repetition rate

YUAN Shuai¹, YU Han¹, ZOU Chixuan¹, CHEN Junyu¹, CHEN Jianing¹, YAN Ming²

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: To solve the problems of low basic repetition rate and wide output pulse width of high repetition frequency femtosecond fiber laser, the main development direction and bottleneck of high repetition frequency fiber ultra-short pulse laser were studied. The mode-locking technologies of high repetition frequency femtosecond fiber lasers were described in detail, such as SESAM mode-locking, NPR mode-locking and NALM mode-locking. The difficulties and technical problems in the field of high repetition frequency femtosecond fiber lasers were discussed. Based on this, the latest research

收稿日期: 2023-02-27

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0504400)

第一作者: 袁帅(1985-), 男, 副教授. 研究方向: 超快非线性光学. E-mail: ye_zoom@126.com

引文格式: 袁帅, 于涵, 邹驰炫, 等. 高重复频率飞秒光纤激光技术进展[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(4): 417-426.

DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230227001

Citation: YUAN Shuai, YU Han, ZOU Chixuan, et al. Progress in femtosecond fiber laser technology with high repetition rate[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(4): 417-426.

progress in the following fields was summarized, including the exploration of new high repetition frequency mode-locking technology, the expansion of high repetition frequency fiber femtosecond laser in the output wavelength and the research of ultra-stable high repetition frequency fiber optical comb. Finally, the typical applications of GHz femtosecond light source in the fields of optical fiber lidar, optical frequency comb and biological detection were briefly described, and their prospects were prospected.

Keywords: *ultrafast laser; laser resonator; fiber laser; nonlinear optics; fiber*

近年来,得益于高功率半导体激光泵浦系统的出现以及光纤掺杂技术的不断进步,高重复频率飞秒激光技术发展迅速^[1-2]。相比重复频率千赫兹以及兆赫兹量级的超短脉冲激光器,重复频率达到吉赫兹(GHz)以上的高重复频率激光器可以将能量聚集在飞秒量级时间内,从而实现极高的峰值功率^[3]。借此创造出一些极端的物理条件,在许多领域发挥着关键作用^[4]。

在光纤激光雷达领域,高重复频率飞秒光纤激光器的优势在于单位时间内输出脉冲数量更多,可通过相干脉冲堆积的方式在固定时间窗口内堆积大量脉冲,获得峰值功率达太瓦量级的飞秒脉冲输出^[5]。太瓦光源可以有效提升雷达的最大作用距离和抗干扰能力^[6]。

在工业加工领域,高重复频率超短脉冲光纤激光器由于低平均功率、高峰值功率的输出特性^[7],在后续放大过程中非线性效应能够很好地被色散补偿,脉冲质量更好。并且更窄的脉冲宽度可以有效降低加工过程中的热量堆积,对应加工速度更快,能量损耗更少^[8]。在光学频率梳领域,高重复频率超短脉冲激光拥有更高的单纵模功率^[9],可以得到更高量子极限噪声的拍频信噪比^[10]。在天文光学定标、卫星导航等领域可以有效地提升视向测量精度,对光谱仪等仪器抖动带来的误差也有良好的校正效果^[11-12]。在生物探测领域,高重复频率激光器较小的纵模间隔对应于高成像分辨率和成像速度,较宽的光谱范围可以检测更多的复杂分子。传统低重复频率超短脉冲激光器伴随着严重的光漂白和光毒效应^[13],而高重复频率激光器较低的单脉冲能量可以避免损伤细胞,改善成像质量。

对高基本重复频率光纤超短脉冲激光而言,提升重复频率的关键在于缩减增益光纤与腔内器件尾纤长度,然而增益光纤长度的缩短会导致腔内功率降低,影响锁模脉冲形成。在锁模方式

上,半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模可以实现高重复频率^[14],但其“慢饱和”脉冲形成机制使其脉宽难以压缩至飞秒。非线性偏振旋转(NPR)锁模基于光学克尔效应实现类可饱和吸收锁模,可以产生飞秒脉冲输出。但为提供足够的非线性相移,对谐振腔长度有所要求,腔长难以缩短^[15]。因此,要得到适用于光学频率梳、脉冲堆积系统的理想种子源,需要解决高重复频率下锁模机制的问题。除此之外,高重复频率导致的单脉冲能量低以及腔内色散元件少引起的色散补偿困难也是产生GHz飞秒激光所面临的重大挑战。

基于上述情况,本文重点介绍高重复频率光纤激光器的主要研究方向和最新进展。列举了高重复频率光纤飞秒激光在重复频率、脉冲宽度,以及输出波长方面的最新进展;讨论了新型高重复频率锁模技术以及超高稳定性高重复频率光梳研究。最后罗列了高重复频率光纤激光器的应用,并对高重复频率超快光纤激光器的未来发展进行展望。

1 高重复频率光纤超短脉冲技术

对光纤激光而言,现阶段主要通过锁模技术实现高重复频率激光输出。而受器件损伤阈值与光纤色散特性影响,当前光纤激光器在重复频率、脉冲宽度等输出指标上相较于传统固体激光技术仍有差距,高重复频率下的锁模机制与孤子形成过程有待进一步研究。

1.1 光纤孤子理论

光纤激光器中孤子脉冲输出特性会随腔内色散与非线性变化发生改变,其演化过程可由单模光纤中非线性薛定谔方程表示^[16]:

$$\frac{\partial A}{\partial Z} = \frac{g}{2} \left(A + \frac{1}{\Omega^2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} \right) - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma |A|^2 A \quad (1)$$

式中: A 为脉冲包络振幅; Z 和 T 分别代表脉冲传播距离与传输所用时间; i 为光强; g 表示腔内增益; Ω 表示增益带宽; β_2 为光纤中的二阶色散; γ 代表光纤非线性系数。等式右侧第一项代表了光脉冲传播过程中增益对脉冲的影响, 后两项分别表示脉冲传播过程中的色散效应与非线性效应。

根据孤子形成时腔内净色散量的不同, 常见的孤子锁模类型可分为负色散孤子、色散管理孤子、自相似孤子, 以及耗散孤子。当光纤激光器实现负色散孤子锁模时, 腔内净色散量多处于负色散区, 脉冲的形成依赖于自相位调制和负色散的平衡^[17]。腔内负色散使得脉冲在时域上展宽, 而非线性效应使脉冲时域压缩, 两者协同作用下可以使得脉冲宽度更窄, 稳定性更高。而负色散孤子受孤子锁模中的面积定理的限制, 当脉冲能量增大到一定程度时, 光纤中的非线性效应也会随之增大, 从而无法实现负色散效应与非线性效应的平衡, 导致脉冲分裂为高阶孤子^[18]。因此, 传统负色散孤子锁模振荡器的单脉冲能量上限被认为限制在 100 pJ^[19] 内。

色散管理型与自相似型孤子锁模则通常位于近零色散区。色散管理孤子产生的基本原理是在腔内加入色散补偿器件或是增益光纤对腔内色散进行调节, 使腔内净色散量接近为零^[20]。脉冲传播中, 正色散区域会使得脉冲平均功率降低, 减少腔内的非线性相移, 从而避免脉冲分裂, 脉冲波形为高斯型^[20]。而自相似型相比色散控制型腔内正色散更多, 脉冲经历相对更强的自相位调制, 脉冲的光谱呈抛物线型。上述锁模激光器内正色散区会使脉冲展宽, 因此色散管理孤子锁模的输出脉冲光谱相比负色散孤子宽很多, 高能量下脉冲也不会分裂, 输出脉冲被提升至 nJ 量级^[21]。

近年来, 在全正色散光纤激光器中产生的耗散孤子受到广泛研究。与传统孤子不同, 耗散孤子并不借助正负啁啾实现锁模, 而是引入带通滤波来维持相互作用平衡^[22]。当脉冲在腔内传播时, 耗散孤子在正色散和自相位调制的共同作用下使脉冲展宽, 此时通过光谱滤波效应限制脉冲频谱, 提供能量耗散使得脉冲稳定输出^[23]。耗散孤子脉冲在净正色散量较大的区间受到线性啁啾展宽更大, 其输出光谱一般呈中间平坦或凹陷, 具有陡峭的光谱边缘^[24]。同时其脉冲宽度较宽, 平均功率较低, 避免了非线性积累导致的脉冲分裂。因此, 单脉冲能量相比色散管理与自相似型

孤子又有明显的上升^[25]。

1.2 高重复频率光纤激光锁模技术

现阶段在光纤激光器中实现高基本重复频率飞秒脉冲输出的锁模方式主要包括以 SESAM 为主的慢饱和吸收体锁模, 以及非线性放大环形镜 (NALM) 和非线性偏振旋转 (NPR) 为主的快饱和吸收体锁模。SESAM 锁模技术多用于线性腔, 可实现 GHz 量级的高重复频率脉冲输出。但锁模过程严重依赖慢饱和机制, 脉冲宽度多被限制在皮秒量级。快饱和吸收体锁模多用于环形腔^[15], 允许更宽的光谱与更短的脉冲宽度, 但相比线性腔重复频率较难提升。针对上述问题, 国内外各科研团队对高重复频率下锁模技术进行了深入研究, 下文将详细梳理上述锁模方式的最新进展。

1.2.1 基于 SESAM 锁模的高重复频率光纤超短脉冲激光器

SESAM 锁模主要利用可饱和吸收材料对不同光强吸收效率不同的特性, 以此窄化脉冲。当脉冲光经过腔内 SESAM 结构时, 强度较高的脉冲中心部分收到损耗较低, 强度较低的脉冲两侧损耗较高, 借此形成稳定的超短脉冲输出^[26]。SESAM 锁模技术也凭借其工艺成熟、高稳定性、结构简单的优势成为目前在光纤激光器工业化领域被应用最多的锁模方式。

当前 1 μm 波段最高基本重复频率的锁模光纤激光器由杨中民团队于 2019 年搭建。组内 Wang 等^[27]使用了 15.2% 的掺镱磷酸盐玻璃光纤^[28], 搭建了腔长仅 7.6 mm 的超短腔。图 1 展示了该激光器实物图, 插图 of 介电膜 (DF) 和 SESAM 的光谱反射率。掺镱玻璃光纤一端与介电镜对接耦合, 另一端连接 SESAM。最终实现重复频率 12.5 GHz、脉宽 1.9 ps 的脉冲输出。2021 年, 山东大学刘兆军团队^[29]在此基础上将高掺杂磷酸盐玻璃光纤替换为净增益系数为 1 dB/cm 的商用石英掺铒 (EDF) 光纤。最终在全光纤 F-P 腔中实现了 5 GHz 基本重复频率, 0.69 nm 光谱覆盖范围, 3.8 ps 光谱宽度的 1561 nm 光纤激光器。该系统通过在光纤套管断面上涂覆多层介电膜, 实现了 2 cm 的激光腔长, 成功将商用 EDF 光纤激光器重复频率提升至 5 GHz, 且稳定性较好, 可以长期工作。

SESAM 锁模技术多用于线性腔并且可以实现全光纤结构, 具有脉冲输出稳定、噪声低、重复频率高等优点。但由于增益光纤长度较短, 无法充分吸收泵浦光, 因此, 当泵浦功率较大时, SESAM

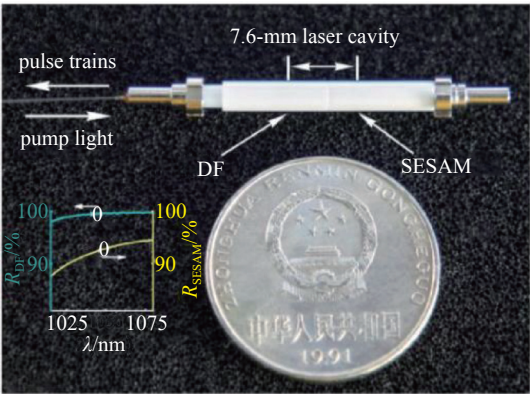


图 1 12.5 GHz SESAM 锁模激光器实物图 [28]

Fig.1 Picture of 12.5 GHz SESAM mode-locked laser [28]

会积累较多的热量，易被损坏。且脉冲宽度多为皮秒量级，难以进一步窄化。

1.2.2 基于NALM锁模的高重复频率光纤超短脉冲激光器

NALM锁模技术通过近似等比的2×2耦合器，将通过其中的入射光分成传播方向相反的两束光脉冲，环路的一侧添加增益光纤以增加腔内的不对称性。在传播过程中积累不同的非线性相移后，于耦合器相遇，发生干涉。NALM锁模技术优势在于可以在兼顾稳定性的前提下实现宽光谱输出，往往能够获得较窄脉冲宽度。同时，NALM技术可以采用保偏光纤作为增益介质，因此，激光器具备更好的机械稳定性。

2016年，Hänsel等[30]提出了一种具有非互易分束器的NALM结构，并搭建了250 MHz掺铒激光器。如图2(a)所示，半波片用作非互易相移器以引入相位偏置，激光器可实现自启动锁模，稳定性良好。2018年，Liu等[31]将非保偏光纤以大曲率半径弯折，使其满足保偏光纤的效果，将重复频率提升至700 MHz。如图2(b)所示，FR以及1/6波片提供2π/3的非互易相位偏置，经光栅对色散管理后，脉冲宽度可缩减至215 fs。

NALM锁模技术可实现全光纤和全保偏结构，稳定性很高。线性臂结构大大缩短了谐振腔长度，同时可以加入色散管理器件，提高重复频率的同时脉冲宽度可达飞秒量级。但由于腔内需要加入相移器等空间器件，无形中增大了腔长，限制了重复频率的进一步提升。目前，基于NALM锁模可实现的最高基本重复频率为700 MHz。

1.2.3 基于NPR锁模的高重复频率光纤超短脉冲激光器

NPR锁模同样基于可饱和吸收原理，与NALM

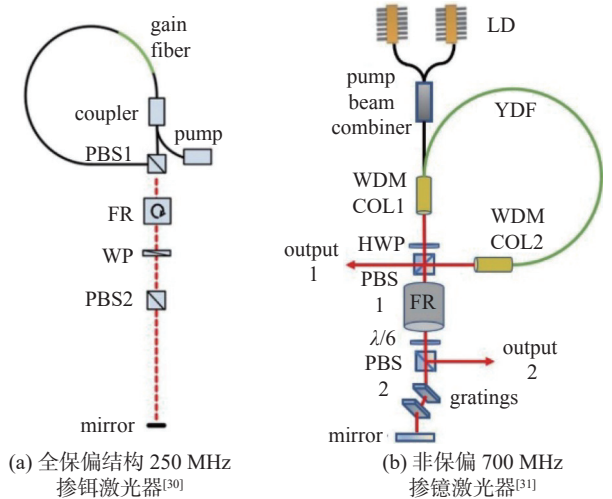


图 2 NALM 锁模光纤激光器

Fig.2 NALM mode-locked fiber laser

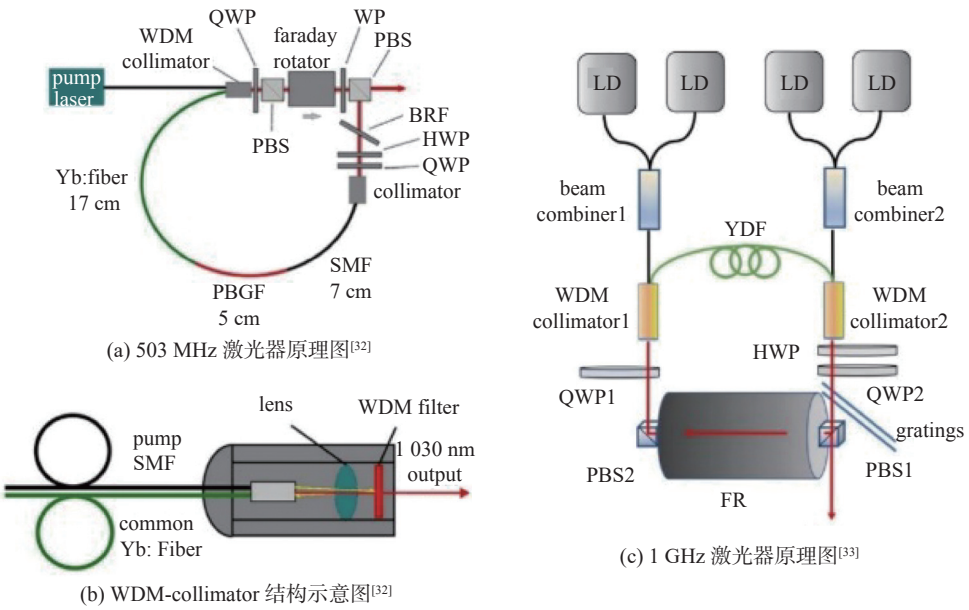
锁模不同的是，NPR锁模并不依靠耦合器将光分束，而是通过改变同一脉冲中两个正交的偏振分量从而改变激光器透射率，实现锁模。谐振腔内半波片和1/4波片组合起到了控制偏振的作用。通过调节波片可以调整腔内偏振达到特定值，使腔内非线性相移达到π以上，从而实现可饱和吸收[15]，并窄化脉冲。

2011年，北京大学张志刚团队[32]将微透镜与二向色镜加载在波分复用器(WDM)上，搭建了503 MHz激光器。光路与WDM结构如图3(a)和(b)所示，通过在环形腔内加入反常色散光纤，使得腔内净色散为近零色散状态，将脉冲宽度压缩至153 fs。2015年，Li等[33]在此基础上采用双向泵浦的方式将重复频率提升至1 GHz，将反常色散光纤改为光栅以调制腔内色散，使激光器在拉伸脉冲状态下工作，最终实现64 fs的窄脉宽输出，其结构如图3(c)所示。

NPR锁模激光器易受外界温度、振动等因素影响，自启动锁模困难。但NPR技术可以实现超短腔，同时，脉冲宽度可达到飞秒量级，其稳定性差的缺陷也可以通过后续添加抗振、温控系统等方式弥补。因此，NPR技术常被用以实现高重复、窄脉宽的脉冲输出。

1.2.4 不同锁模方式的对比分析

近年来国内外对高重复频率光纤激光器研究较多，为便于比较，将上文部分代表性实验结果总结至表1中。



QWP 1/4 波片; SMF 单模光纤; BRF 双折射滤波器; PBGF 光子带隙光纤;

图 3 NPR 锁模光纤激光器

Fig.3 NPR mode-locked fiber laser

表 1 近年来高重复频率光纤激光器国内外研究工作总结

Tab.1 Summary of research work on high repetition rate fiber lasers at home and abroad in recent years

锁模技术	参考文献	发表年份	重复频率/ GHz	脉冲宽度/fs	中心波长 /nm	光谱宽度/ nm
SESAM	[28]	2011	12.50	1900	1047	0.9
	[34]	2017	5.00	2600	1060	1
	[29]	2021	5.00	3800	1030	0.69
	[30]	2017	0.25	72	1565	43
NALM	[35]	2017	0.50	84.4	1040	31
	[31]	2018	0.70	215	1030	7.8
	[32]	2011	0.50	153	1030	34
	[36]	2013	0.75	68	1037	23
NPR	[33]	2015	1.00	64	1030	23
	[37]	2022	1.00	44	1030	58

综合表 1 中激光器输出参数可以发现，基于 SESAM 锁模技术搭建的光纤激光器在输出重复频率方面相较于 NPR，NALM 锁模有较大优势。其原因在于 SESAM 激光器大多基于线性腔搭建，腔内器件集成度较高，空间尺寸小，能实现毫米量级的超短腔。目前在 1 μm 波段通过 SESAM 锁模可实现的最高基本重复频率为 12.5 GHz^[28]。但受自身材料寿命和工作带宽的限制，高重复频率 SESAM 锁模激光器受强光冲击较易受损，输出脉宽难以窄化至飞秒量级。NALM 锁模光纤激光器

通过补偿腔内色散，可以实现飞秒量级的脉冲输出，在输出脉宽上相较于 SESAM 锁模有明显提升。激光器可以实现全光纤、全保偏结构，脉冲输出稳定性优异。然而，NALM 锁模需要在腔内加入相移器或一定长度的光纤以实现锁模。受器件尺寸限制，腔长难以进一步缩减，重复频率相对较低。利用 NPR 锁模技术可以将脉宽缩短至飞秒，其空间尺寸相较 NALM 锁模更为紧凑，可以实现超短腔结构从而获得 GHz 量级的脉冲输出。但是，NPR 锁模激光器多为半光纤与非保偏结

构，易受温度、振动影响，稳定性相对较差。尽管如此，通过整机封装和添加温控系统可以有效提升激光器抗干扰能力，NPR 锁模仍具有较大的发展潜力。

2 高重复频率光纤超短脉冲激光领域的关键科技问题与最新进展

就激光技术而言，受限于光纤激光器较窄的增益带宽、可饱和吸收体较低、损伤阈值较低，以及光纤内部色散补偿问题，当前光纤激光器较难同时实现高基本重复频率(>1 GHz)和短脉冲宽度(<50 fs)的脉冲输出，相较于传统固体激光技术仍有差距^[38]。为进一步提升光纤激光器输出性能，探索损伤阈值更高、可饱和吸收更好、使用寿命更长的新型锁模方式成为了当前高重复频率光纤激光的研究热点。在应用方面，飞秒光学频率梳作为高重复频率光纤激光器的重要应用领域，对系统整体稳定性要求极高。一般而言，高重复频率激光系统腔长较短，微弱的腔长抖动都会影响输出频率。GHz 重复频率下，光纤激光器相比固体激光器具有更高的非线性与大啁啾，自发辐射噪声也相对较大^[39]。因此，如何降低高重复频率激光器工作时整体的噪声成为了限制飞秒光梳发展的主要科学问题。除此之外，当前常规的锁模光纤激光器主要集中在掺镱、掺铒光纤上，波长限定为 1 μm 和 1.5 μm。较少的输出波长选择限制了高重复频率激光技术的进一步应用，因此，如何实现更多波段的高重复频率激光输出也成为了现阶段光纤激光的主要研究方向。针对上述关键科技问题，国际上多家研究单位开展重点攻关。当前国际上飞秒光纤激光器的主要研究方向可被总结为以下几类：

a. 针对光纤激光器难以同时实现高重复频率与窄脉冲宽度的问题，新型锁模技术探索成为目前光纤激光领域的研究热点。碳纳米管、石墨烯、二硫化钼等新型器件，已经被证明可以用于实现光纤超短脉冲激光锁模。上述新型饱和吸收体的出现有望解决传统 SESAM 损伤阈值低、使用寿命短的缺陷。这方面虽然有很多文献发表，但是鲜有高重复频率光纤激光产品真正采用上述器件。

b. 为抑制高重复频率光纤激光器的腔内噪声，从而实现更高精度的时域光梳光谱检测，国

内外众多科研单位对超高稳定性高重复频率光纤激光器展开研究。光纤光梳是高重复频率激光器的重要应用出口。这方面的研究集中在 GHz 重复频率的检测与反馈、色散控制与噪声的关系、高稳定度参考源等方面。如何将超高稳定性高重复频率光纤光梳的时间抖动缩小到百阿秒尺度，是当前炙手可热的研究主题。

c. 为进一步拓宽光纤激光器的应用场景，高重复频率光纤激光器的波长拓展也成为了当前光纤激光的重要研究方向。现阶段锁模光纤激光器波长大多被限定为 1 μm 和 1.5 μm，然而在光纤通信、激光成像等诸多应用领域需要其他波长，如 930 nm、1330 nm、2 μm 波段等。这些波长的飞秒光纤激光器成为新的研究方向。

2.1 新型锁模技术的探索

新型锁模技术泛指除 SESAM，NPR，NALM 锁模之外的被动锁模技术。研究发现碳纳米管、石墨烯、二硫化钼等材料也具备饱和吸收特性，相比传统 SESAM，新型纳米材料饱和吸收体在损伤阈值、恢复时间和使用寿命方面有所提升^[40]，与高掺杂增益光纤及法布里-帕罗腔相结合，可以实现较高的重复频率。

自 1999 年 Katura 等^[41]首次观察到了碳纳米管(CNTs)在可见光和近红外范围的吸收光谱以来，CNTs 优异的快饱和吸收特性引起了学者们的极大兴趣。2005 年，Yamashita 团队^[42]将 CNTs 用作可饱和吸收体，在 F-P 腔中加入铒镱共掺增益光纤，构建了重复频率 5.18 GHz，脉冲宽度 580 fs 光纤激光器。两年后，Song 等^[43]在此基础上通过使用镜面镀膜半导体光放大器作为增益介质，将重复频率提升至 17.2 GHz。当前 CNTs 锁模实现的最高重复频率光纤激光器由东京大学团队搭建，其结构如图 4 所示。组内 Martinez 等^[44]以一段 5 mm 的铒镱共掺磷酸盐玻璃光纤作为增益介质，并在其两侧涂覆高反射介电镜。在全光纤 F-P 腔内成功实现了最高重复频率为 19.45 GHz、脉冲宽度为 1 ps

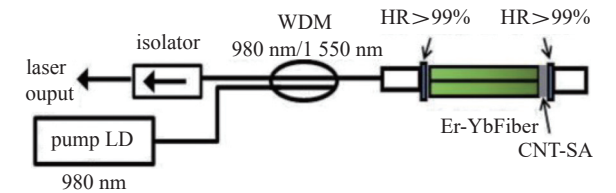


图 4 基于 CNTs 锁模实现的 GHz 光纤振荡器结构示意图^[44]
Fig.4 Schematic of GHz fiber optic oscillator based on CNTs^[44]

的锁模脉冲输出。

随着一维碳材料 CNTs 被成功用于激光锁模, 2009 年, 二维碳材料石墨烯也被用于被动锁模^[45]。相比半导体材料, 石墨烯恢复时间更快, 耦合损耗更小, 工作光谱范围更宽, 有着不错的应用前景。2012 年, 东京大学 Martinez 等^[46]以铟镱共掺的磷酸盐光纤为增益介质, 利用石墨烯的可饱和吸收特性实现锁模, 并将腔长缩短至 10 mm 左右。最终获得了中心波长 1562 nm, 基本重复频率 9.67 GHz, 脉冲宽度 880 fs 的脉冲输出。

基于石墨烯锁模的成功案例, 石墨烯类似物的二硫化钼(MoS₂)也被发现具有饱和吸收特性^[47]。2015 年, Wu 等^[48]利用包埋 MoS₂ 的聚乙烯醇薄膜作为可饱和吸收体搭建了锁模光纤激光器, 并得到了重复频率 463 MHz 的稳定脉冲序列。

2.2 超高稳定性高重复频率光纤激光器/光梳研究

通过大幅减少谐振腔内光机结构的方式可以实现时间抖动达百阿秒尺度的光纤激光输出。其超高的稳定性在低噪声微波源、光频原子钟、天文光梳等研究领域有着巨大的应用潜力。研究发

现, 锁模光纤激光器在 100~250 MHz, 显示出与固体激光器可比拟的低定时抖动。但当重复频率大于 500 MHz 时, 锁模的光纤激光器的时间抖动却高达数十飞秒, 远高于固体激光器。因此, 解决上述问题是实现超高稳性的高重复频率光纤激光器的关键。2018 年, Wang 等^[49]基于平衡光学互相关手段, 表征了 880 MHz 掺镱 NPR 光纤激光器脉冲序列的定时抖动。发现复杂的光机结构, 尤其是激光器中自由空间组件的支架, 对脉冲稳定性有较大影响。2022 年, Yang 等^[50]基于石英玻璃粘接工艺技术平台, 提出了“laser/comb on silica”概念。如图 5(a)所示, 上述重复频率 840 MHz 激光器将元件集成到熔融石英玻璃板上, 整个腔内无任何金属元件, 从而机械噪声抑制到最小。激光器 12 h 内重复频率漂移小于 1 kHz, 显示出异常的稳定性。如图 5(b)所示, 该激光器在自由运转下时间抖动为 130 as, 在 10 kHz 频偏处的单边带相位噪声约为 -161 dBc/Hz, 时间抖动值与 100 MHz 的光纤激光器相同, 仅略高于同重复频率的固体激光器。该研究成果为在光频原子钟、天文光梳等重要领域中心应用铺平了道路。

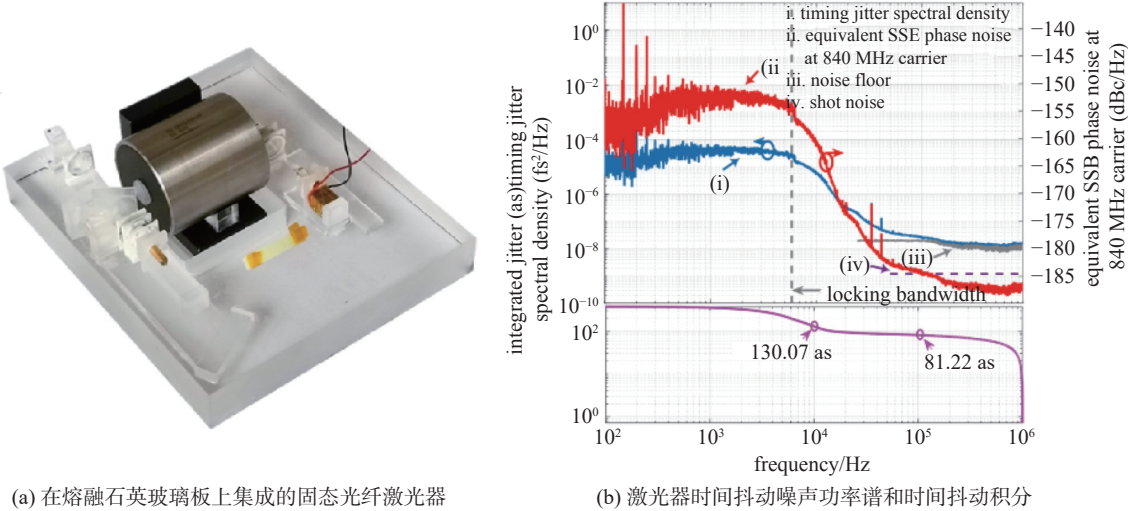


图 5 固态光纤激光及其时间抖动噪声功率谱^[50]

Fig.5 Solid-state fiber laser cavity and timing jitter spectrum

在高重复频率光学频率梳方面, 当前 500 MHz 以上的激光光频梳多基于 NPR 锁模光纤激光器实现。2018 年, Ma 团队^[51]通过电光调制器与压电换能器组合快速调制腔长, 从而根据光外差拍频率锁定腔长。搭建了 2 个低噪声 750 MHz 掺镱光纤频率梳, 1 s 的环外跟踪不稳定性为 1.5×10^{-18} 。2022 年, Tian 等^[52]在此基础上利用两个 750 MHz

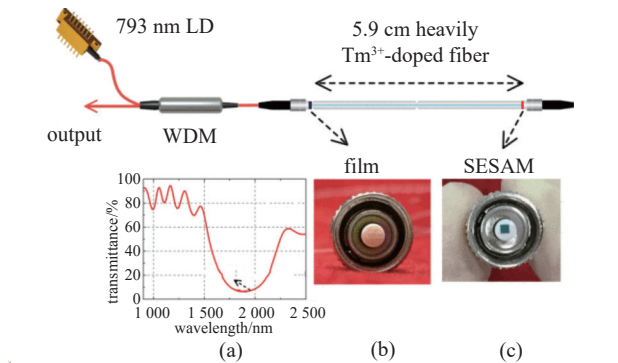
掺镱光纤频率梳辅助 RF 锁相。通过对双光梳平移相位(offset phase)修正后, 射频线宽从 200 kHz 降低至 1 kHz。该双光梳系统可精确标定气态乙炔的吸收曲线, 验证了该方法的有效性。

2.3 高重复频率光纤飞秒激光在输出波长方面的拓展

除 1 μm 和 1.5 μm 的锁模光纤激光器外, 波长

为 2 μm 的飞秒脉冲也因其较少的散射和高水吸附而备受关注^[53]。为满足遥感和成像、组织烧蚀和聚合物焊接等领域日益增长的需求^[54-55]，2.0 μm 脉冲激光器的开发成为了研究热点。其中，2 μm 波段高重复频率超短脉冲激光器可以带来更大的纵向模式间距^[56]，显著提高短波红外和中红外光梳的采集速率^[57]。

在众多 2.0 μm 脉冲激光器中，掺铥光纤激光器因其占地面积极小、可靠性高、光束质量好而备受关注。为获得高重复频率的基模锁定，使用高增益光纤缩短激光腔极其关键。但受限于铥掺杂增益光纤的高 Tm³⁺ 掺杂浓度和玻璃纤维低 OH⁻ 含量^[58]，极少有研究报道 2 μm 波段 GHz 基本重复频率掺铥激光器。2018 年，杨中民团队制造了一种高 Tm³⁺ 掺杂的铍酸钡(BGG)玻璃光纤^[59]，该光纤在 2 μm 波段有着优异的增益系数。Cheng 等^[60]以一段 5.9 cm 的 BGG 光纤为增益光纤，基于 SESAM 锁模搭建了 GHz 掺铥光纤振荡器。图 6 展示了激光腔结构示意图，掺铥 BGG 光纤两端平面垂直抛光。一端与介电膜对接耦合，另一端与 SESAM 连接。介电膜透射光谱与腔内器件实物图如图 6(a)~(c)所示。最终成功实现重复频率 1.6 GHz，脉宽 7.2 ps，光谱宽度 12.2 nm 的脉冲输出。该系统可以在 20 °C 温度下持续 10 h 保持锁模操作，没有明显波长漂移，具有较高的稳定性。



(a)介电膜的光学透射光谱；(b)涂覆在光纤套圈上的高反射电介质膜；(c)置于光纤末端的SESAM

图 6 1 GHz 掺铥光纤激光振荡器结构示意图^[60]
Fig.6 1 GHz Tm³⁺-doped BGG fiber laser^[60]

3 总结与展望

高重复频率飞秒脉冲凭借纵模间隔短、峰值功率高、输出脉宽窄的特性，在激光雷达、高端制造、光学频率梳等诸多领域具有极高的应用价

值^[61]。在高端制造领域，高重复频率激光输出在时间尺度上拥有更少脉冲占空比，自发辐射可以得到更好抑制，热效应更小，是微纳加工的良好光源^[62]。在光学频率梳领域，高重复频率超快光源可以有效减少光滤波次数，而光纤结构可以有效压缩系统体积，其较高的稳定性可将光纤光梳的时间抖动缩小到百阿秒尺度^[63]，在天文光学定标、太赫兹异步采样、拉曼光梳等研究方向有更为良好的表现^[64]。在光丝激光雷达领域，高重复频率激光器因其单位时间内脉冲数量较多的特性，可被用作种子源，通过相干脉冲堆积的方法，实现太瓦量级的飞秒脉冲输出^[65]。

随着腔内脉冲形成与孤子演化理论的深入、锁模机制的研究、腔内结构的改进以及材料高掺杂技术的发展，超短脉冲激光器的重复频率将进一步提高，工作波长也将进一步拓展。相信高重复频率超短脉冲激光器的发展也会为更多研究领域带来新的突破。

参考文献：

[1] YANG Q B, JIAO Y, YU C L, et al. Gain and laser performance of heavily Er-doped silica fiber fabricated by MCVD combined with the sol-gel method[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 110603.

[2] WANG Y F, LI X Y, WU J M, et al. Three-level all-fiber laser at 915 nm based on polarization-maintaining Nd³⁺-doped silica fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(1): 011401.

[3] LI H H, LIU J, CHENG Z C, et al. Pulse-shaping mechanisms in passively mode-locked thulium-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6292–6303.

[4] YANG H Y, WANG A M, MA Y F, et al. High repetition rate all-normal dispersion Yb: fiber laser for minimum pulses[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(3): 033201.

[5] 张志刚. 相干脉冲堆积——超越啁啾脉冲放大的新技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120001.

[6] YAN D X, WANG Y Y, XU D G, et al. High-average-power, high-repetition-rate tunable terahertz difference frequency generation with GaSe crystal pumped by 2 μm dual-wavelength intracavity KTP optical parametric oscillator[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(2): 82–87.

[7] LUO Y M, JIA W, SONG Y J, et al. High-repetition-rate femtosecond laser micromachining of poly(methyl methacrylate)[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(7): 070003.

[8] LUO Z, WANG C, DONG X R, et al. Femtosecond laser

- highly-efficient plane processing based on an axicon-generated donut-shaped beam[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(3): 031401.
- [9] YANG G, SHI H S, YAO Y, et al. Long-term frequency-stabilized optical frequency comb based on a turnkey Ti:sapphire mode-locked laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(12): 121405.
- [10] HERR T, MCCracken R A. Astrocobs: recent advances[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(23): 1890–1893.
- [11] TSUZUKI M, JIN L, YAMANAKA M, et al. Midinfrared optical frequency comb based on difference frequency generation using high repetition rate Er-doped fiber laser with single wall carbon nanotube film[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6): 313–317.
- [12] 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(7187): 610–612.
- [13] JI N, MAGEE J C, BETZIG E. High-speed, low-photodamage nonlinear imaging using passive pulse splitters[J]. *Nature Methods*, 2008, 5(2): 197–202.
- [14] OU S M, YU Z Q, GUO L, et al. GHz-repetition-rate fundamentally mode-locked, isolator-free ring cavity Yb-doped fiber lasers with SESAM mode-locking[J]. *Optics Express*, 2022, 30(24): 43543–43550.
- [15] 张志刚. 高重复频率飞秒光纤激光技术进展 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900130.
- [16] LIAO J L, GAO Y, SUN Y L, et al. Effects of third-order dispersion on temporal soliton compression in dispersion-engineered silicon photonic crystal waveguides[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 729–736.
- [17] MOLLENAUER L F, STOLEN R H. The soliton laser[J]. *Optics Letters*, 1984, 9(1): 13–15.
- [18] STASEVIČIUS I, VENGRIS M. Controlled soliton formation in a femtosecond optical parametric oscillator with positive group delay dispersion[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(10): 2956–2967.
- [19] ILDAY F Ö, BUCKLEY J R, CLARK W G, et al. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(2): 213902.
- [20] HAN X X. Nanotube-mode-locked fiber laser delivering dispersion-managed or dissipative solitons[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(8): 1472–1476.
- [21] 时雷, 马挺, 吴浩煜, 等. 48 fs, 108 MHz 色散管理孤子掺 Er^{3+} 光纤激光器 [J]. 量子电子学报, 2017, 34(3): 327–332.
- [22] CHONG A, RENNINGER W H, WISE F W. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20 nJ[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2408–2410.
- [23] 张祖兴, 戴国星. 全正色散耗散孤子掺镱光纤激光器 [J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0214005.
- [24] 刘雪明, 毛东, 王播然. 耗散孤子光纤激光器的研究进展和应用 [J]. 科学通报, 2012, 57(32): 3039–3054.
- [25] LIU X M, CUI Y D. Revealing the behavior of soliton buildup in a mode-locked laser[J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(1): 016003.
- [26] LV Z G, YANG Z, LI F, et al. SESAM mode-locked all-polarization-maintaining fiber linear cavity ytterbium laser source with spectral filter as pulse shaper[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(12): 125103.
- [27] WANG W L, LIN W, CHENG H H, et al. Gain-guided soliton: scaling repetition rate of passively modelocked Yb-doped fiber lasers to 12.5 GHz[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10438–10448.
- [28] XU S H, YANG Z M, ZHANG W N, et al. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb^{3+} -doped phosphate fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3708–3710.
- [29] GAO X B, ZHAO Z G, CONG Z H, et al. Stable 5-GHz fundamental repetition rate passively SESAM mode-locked Er-doped silica fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 9021–9029.
- [30] HÄNSEL W, HOOGLAND H, GIUNTA M, et al. All polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation[J]. *Applied Physics*, 2017, 123(1): 41.
- [31] LIU G Y, JIANG X H, WANG A M, et al. Robust 700 MHz mode-locked Yb: fiber laser with a biased nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26003–26008.
- [32] WANG A M, YANG H Y, ZHANG Z G. 503MHz repetition rate femtosecond Yb: fiber ring laser with an integrated WDM collimator[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25412–25417.
- [33] LI C, MA Y X, GAO X, et al. 1 GHz repetition rate femtosecond Yb: fiber laser for direct generation of carrier-envelope offset frequency[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 8350–8353.
- [34] CHENG H H, WANG W L, ZHOU Y, et al. 5 GHz fundamental repetition rate, wavelength tunable, all-fiber passively mode-locked Yb-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27646–27651.
- [35] LIU G Y, WANG A M, ZHANG Z G. 84-fs 500-MHz Yb: fiber-based laser oscillator mode locked by biased NALM[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(23): 2055–2058.
- [36] LI C, WANG G Z, JIANG T X, et al. 750 MHz fundamental repetition rate femtosecond Yb: fiber ring laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 314–316.
- [37] 沈佳伟. GHz 基本重复频率超短脉冲掺镱光纤激光器研究 [D]. 上海: 上海理工大学, 2022: 10–13.
- [38] CHEN H W, CHANG G Q, XU S H, et al. 3 GHz,

- fundamentally mode-locked, femtosecond Yb-fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3522–3524.
- [39] PETERSON W, DE PABLO J G, LINDLEY M, et al. Ultrafast impulsive Raman spectroscopy across the terahertz–fingerprint region[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(1): 016003.
- [40] SAKAKIBARA Y, TATSUURA S, KATAURA H, et al. Near-infrared saturable absorption of single-wall carbon nanotubes prepared by laser ablation method[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(5A): L494–L496.
- [41] KATAURA H, KUMAZAWA Y, MANIWA Y, et al. Optical properties of single-wall carbon nanotubes[J]. *Synthetic Metals*, 1999, 103(1/3): 2555–2558.
- [42] YAMASHITA S, INOUE Y, HSU K, et al. 5-GHz pulsed fiber Fabry-Pérot laser mode-locked using carbon nanotubes[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(4): 750–752.
- [43] SONG Y W, YAMASHITA S, GOH C S, et al. Passively mode-locked lasers with 17.2-GHz fundamental-mode repetition rate pulsed by carbon nanotubes[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 430–432.
- [44] MARTINEZ A, YAMASHITA S. Multi-gigahertz repetition rate passively modelocked fiber lasers using carbon nanotubes[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6155–6163.
- [45] 宋浩青, 杨爱英. 石墨烯被动锁模光纤激光器的研究进展[J]. *激光与红外*, 2013, 43(2): 137–143.
- [46] MARTINEZ A, YAMASHITA S. 10 GHz fundamental mode fiber laser using a graphene saturable absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(4): 041118.
- [47] ZHANG H, LU S B, ZHENG J, et al. Molybdenum disulfide (MoS_2) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7249–7260.
- [48] WU K, ZHANG X Y, WANG J, et al. 463-MHz fundamental mode-locked fiber laser based on few-layer MoS_2 saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1374–1377.
- [49] WANG Y, TIAN H C, MA Y X, et al. Timing jitter of high-repetition-rate mode-locked fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4382–4385.
- [50] YANG R A, ZHAO M H, JIN X G, et al. Attosecond timing jitter from high repetition rate femtosecond “solid-state fiber lasers” [J]. *Optica*, 2022, 9(8): 874–877.
- [51] MA Y X, XU B, ISHII H, et al. Low-noise 750 MHz spaced ytterbium fiber frequency combs[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4136–4139.
- [52] TIAN H C, LI R M, STERCZEWSKI L A, et al. Quasi-real-time dual-comb spectroscopy with 750-MHz Yb: fiber combs[J]. *Optics Express*, 2022, 30(16): 28427–28437.
- [53] TAN S S, YANG L X, WEI X M, et al. High-speed wavelength-swept source at 2.0 μm and its application in imaging through a scattering medium[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(8): 1540–1543.
- [54] KRONENBERG P, TRAXER O. The laser of the future: reality and expectations about the new thulium fiber laser—a systematic review[J]. *Translational Andrology and Urology*, 2019, 8(S4): S398–S417.
- [55] MINGAREEV I, WEIRAUCH F, OLOWINSKY A, et al. Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2095–2099.
- [56] SANCHEZ D, HEMMER M, BAUDISCH M, et al. 7 μm , ultrafast, sub-millijoule-level mid-infrared optical parametric chirped pulse amplifier pumped at 2 μm [J]. *Optica*, 2016, 3(2): 147–150.
- [57] YU M J, OKAWACHI Y, GRIFFITH A G, et al. Silicon-chip-based mid-infrared dual-comb spectroscopy[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1869.
- [58] HEIDT A M, HODASI J M, RAMPUR A, et al. Low noise all-fiber amplification of a coherent supercontinuum at 2 μm and its limits imposed by polarization noise[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 16734.
- [59] WEN X, TANG G W, WANG J W, et al. Tm^{3+} doped barium gallo-germanate glass single-mode fibers for 2.0 μm laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7722–7731.
- [60] CHENG H H, LIN W, LUO Z Q, et al. Passively mode-locked Tm^{3+} -Doped fiber laser with gigahertz fundamental repetition rate[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1100106.
- [61] 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.
- [62] KERSE C, KALAYCIOĞLU H, ELAHI P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84–88.
- [63] 张志刚. 天文光梳技术现状与分析 [J]. *计测技术*, 2022, 42(5): 23–29.
- [64] 沈嘉伟, 王勇, 司璐, 等. 163 MHz/786 fs 高基础重复频率掺镱飞秒光纤激光振荡器 [J]. *光学仪器*, 2022, 44(3): 31–36.
- [65] ABUDUWEILI A, WANG J, YANG B W, et al. Reinforcement learning based robust control algorithms for coherent pulse stacking[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 26068–26081.