

文章编号: 1002-1582(2026)01-0032-10

重复频率 GHz 超短脉冲锁模激光器的研究进展

陈腾^{1,2}, 刘晓萌^{2*}, 王将², 陈唐涵², 郭和庆², 张圣梓², 向军¹, 葛北鱼²

(1. 江苏科技大学 理学院, 江苏 镇江 212100)

(2. 中国计量科学研究院 热工计量科学研究所, 北京 100029)

摘 要: GHz 以上重复频率的超短脉冲锁模激光器正处于快速发展的阶段, 预计将为激光技术的应用带来更大的创新与突破。这类激光器不仅在重复频率和脉冲宽度上实现了突破, 还在稳定性和输出功率上得到了增强。为了满足各类高端应用需求, 研究者们不断探索新的架构和技术, 以提高激光系统的整体性能。文章将从高重复频率和超短脉冲这两个重要的激光指标来简要论述近年来国内外的部分研究工作。分别介绍了重复频率 GHz 以上的超短脉冲锁模光纤激光器和固体激光器的发展状况及应用。

关 键 词: 激光器; GHz; 重复频率; 超短脉冲; 锁模

中图分类号: TN248

文献标识码: R

Research progress of ultrafast pulsed Mode-locked lasers with GHz repetition rates

CHEN Teng^{1,2}, LIU Xiaomeng^{2*}, WANG Jiang², CHEN Tanghan²,

GUO Heqing², ZHANG Shengzi², XIANG Jun¹, GE Beiyu²

(1. School of Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

(2. Institute of Thermal Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Ultrafast pulsed mode-locked lasers with repetition rates above GHz are in a stage of rapid development and are expected to bring greater innovations and breakthroughs to the applications of laser technology. These lasers have not only achieved breakthroughs in repetition rate and pulse width but also enhanced stability and output power. To meet the needs of various high-end applications, researchers are constantly exploring new architectures and technologies to improve the overall performance of laser systems. Some domestic and international research work in recent years will be discussed from the perspective of two important laser indicators: high repetition rate and ultrafast pulses. It will respectively introduce the development status and applications of ultrafast pulsed mode-locked fiber lasers and solid-state lasers with repetition rates above GHz.

Keywords: lasers; GHz; repetition frequency; Ultra-short pulses; Mode-locking

0 引 言

在激光技术的快速发展背景下, 超短脉冲锁模激光器因其在半导体制造^[1]、医疗美容^[2]、光电

子显微镜^[3]等领域受到广泛关注。特别是重复频率在 GHz 以上的超短脉冲激光器, 凭借其能够产生高重频、高峰值功率的脉冲光源, 为现代技术提供了强有力的支持。

收稿日期: 2025-08-28; 收到修改稿日期: 2025-10-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF0610804)

作者简介: 陈腾 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事固体激光器研究。1093752649@qq.com

刘晓萌 (1979—), 女, 副高级, 博士, 从事固体激光、激光雷达和激光探测领域研究。

* 通讯作者: liuxiaom@nim.ac.cn

这类可以产生脉冲持续时间为皮秒(10^{-12} 秒)到飞秒(10^{-15} 秒)量级的极短脉冲激光器,称之为超短脉冲激光器。在单脉冲能量保持不变的情况下,超短脉冲激光由于其脉冲宽度相对较短,因此可以表现出较高的峰值功率,这一特性使其在对峰值功率有较高需求的多个领域得到了广泛应用。研究人员在1961年就提出了调Q技术,调Q技术就是一种压缩激光脉冲宽度,提高激光峰值功率的核心技术。该技术在当时可以实现脉冲宽度为纳秒级别的短脉冲激光输出。为了实现更短的脉冲宽度的激光输出,锁模技术成为了必要的手段。锁模技术在光学领域是一种生成超短脉冲激光的方法,其产生的激光脉冲宽度通常介于皮秒和飞秒之间。锁模技术就是把激光器的谐振腔内多个纵模相位互相锁定起来。自20世纪70年代以来,锁模激光器得到了迅猛发展。在当时利用锁模技术的染料激光器是得到超短脉冲激光输出的首要选择,随后至90年代基于克尔透镜锁模的掺钕蓝宝石激光器的出现,引发了科研人员对超短脉冲研究的广泛关注。

近年来,随着锁模技术的进步和材料科学的发展,GHz级别的重复频率锁模激光器的研究也取得了显著的进展。锁模激光器可以分为主动锁模和被动锁模两大类。主动锁模就是在谐振腔内加入一个调制器,这个调制器通常是声光或电光调制器。当给一个周期性信号给调制器时,调制器就会对激光的振幅或者相位进行调制,从而实现激光器的模式锁定。被动锁模是一种利用非线性光学效应来生成超短脉冲输出的技术。在被动锁模激光器中,通常需要使用可饱和吸收体材料,这种材料对于腔内的弱光脉冲,其吸收能力较高,对于强光脉冲,其吸收能力较弱。近年来随着一些新型可饱和吸收体材料的出现,使得超短脉冲激光器的性能也得到了优化。此外,多种激光器架构的提出,如光纤激光器^[4-7]、固体激光器^[8-10]以及半导体激光器^[11,12],为GHz超短脉冲激光器的实现提供了更多的可能性。

然而,尽管已经取得了一些进展,GHz重复频率超短脉冲锁模激光器仍面临诸多挑战,如稳定性、热管理、系统集成等问题。因此,深入研究和探索其物理机制、优化设计及提高性能依然是一个重要的研究方向。这一领域的持续探索将为激光技术的进一步发展和应用开辟更广阔的前景,推动激光科学的创新与应用。

1 光纤锁模激光器

光纤激光器由于其装置简易小巧、集成度高、

光束质量好、稳定性高等优点已经被众多行业广泛应用。其中超高重复频率的超短脉冲锁模光纤激光器一直是研究员们研究的重点,近年来其也对许多领域具有很大的推动力。光纤激光器的锁模机制主要可以分为主动锁模和被动锁模两大类。主动锁模技术是在谐振腔内加入一调制器来对腔内激光进行调制,因此主动锁模可以提供更高的灵活性,但是其系统较复杂。目前在光纤激光器中所应用的主动锁模技术主要有电光和声光调制器锁模。在光纤锁模激光器中被广泛应用的被动锁模技术主要有SESAM锁模、非线性放大环形镜锁模(NALM)和非线性偏振旋转锁模(NPR)。被动锁模光纤激光器有很好的自调整能力,其也可以在较简易的系统中得到超短脉冲激光输出。光纤激光器在锁模机制和光学效应的影响下生成超短脉冲能否成功,关键在于如何管理色散和非线性效应,以及选取适当的光纤材料以优化激光性能。

1.1 主动锁模光纤激光器

主动锁模激光器通常需要外部信号来进行调制,例如电光调制器或者声光调制器的控制信号。这个调制信号必须在锁模条件下以合适的频率和幅度提供,使得激光能够实现脉冲输出。

在超短脉冲激光技术中,谐波锁模是一种通过特定调控手段使激光输出脉冲重复频率为基础腔频整数倍的锁模技术,推动了超短脉冲激光从“超短”向“高频+超短”的功能拓展。谐波锁模技术最开始是应用在主动锁模光纤激光器中。1990年Takada采用谐波锁模技术,其使用由15GHz射频信号驱动 Ti:LiNbO₃ 电光调制器作为锁模器件实现了重复频率为30GHz,脉冲宽度为7.6ps的脉冲输出^[13]。1994年Nakazawa利用调制器首次实现了谐波再生锁模,可得到重复频率为10GHz、脉宽为2.7ps的脉冲输出^[14]。1996年Ahmed团队首次在主动锁模光纤激光器内实现有理数谐波锁模,通过合理调节调制频率与基频谐波的频率差,得到重复频率为7GHz、14GHz和21GHz的锁模脉冲序列^[15]。同年Nakazawa团队通过掺铒光纤激光器采用有理数谐波锁模技术,获得了高达80~200GHz的脉冲序列^[16]。1998年日本学者Abedin等提出利用深度相位调制的方式,通过结合高精度F-P滤波器实现了“高阶相位锁模”,在主动锁模光纤激光器中实现重复频率倍增^[17]。近年来Jiarong Qin等在2018年展示了一种主动锁模光纤激光器,其通过使用7GHz的调制信号获得了14GHz和21GHz的重复频率激光脉冲输

出。并且其只需通过调整射频驱动信号就可将输出激光脉冲的重复频率从 14.6MHz 变为 19GHz。这在当时在 2μm 主动锁模光纤激光器中，这款激光器的重复频率是最高的^[18]。同年 W Ma 等将掺钛光纤用作增益介质，展示了一台主动锁模光纤激光器，其可以得到重复频率为 10GHz 的激光脉冲输出^[19]。2021 年，Sun Y 展示了一种具有可控重复频率的 2μm 主动锁模光纤激光器，实验装置如图 1 所示，可得到高达 6GHz 的主动锁模脉冲，重复频率可连续调谐。此外，脉冲宽度和重复频率可以独立控制，该研究成果将促进光纤激光在数据传输和商业化的应用^[20]。

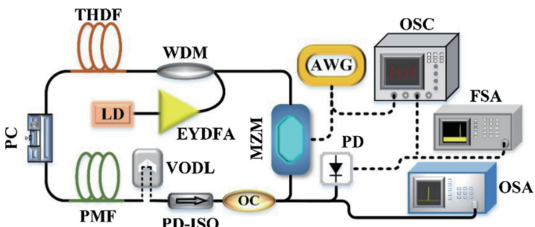


图 1 重复频率可调谐的主动锁模光纤激光器^[20]

主动谐波锁模光纤激光器虽然能够实现较高的重复频率脉冲输出，但由于其对腔长和调制信号的依赖度高，该类激光器的稳定性易受外界干扰，长期运行可靠性差。相较于被动锁模机制，主动锁模光纤激光器在脉冲宽度和噪声控制上存在明显短板，在主动谐波锁模激光器中，脉冲宽度的压缩能力直接受制于调制器的调制深度，这使得其输出脉冲的宽度通常停留在皮秒级别，难以进一步突破到飞秒级别。同时，随着谐波次数的增加，激光腔内循环的脉冲数量会同步增多。这一过程会显著提升脉冲间能量分布的控制难度，导致不同脉冲的能量差异变大，最终对输出信号的一致性产生严重影响。

1.2 被动锁模光纤激光器

被动锁模光纤激光器具有较多优点，例如其结构简洁、脉冲宽度短、体积紧凑和光谱范围短等。因此，被动锁模光纤激光器在近年来成为研究人员关注的重点。由于锁模脉冲的重复频率与谐振腔的腔长呈反比关系，因此可以通过缩短激光器谐振腔的腔长来提升锁模激光脉冲的重复频率。如果要得到 GHz 以上的超高重复频率锁模脉冲，那么缩短谐振腔腔长就成为一必要手段。随着可饱和吸收体的出现，例如半导体可饱和吸收体 (SESAM)、碳纳米管 (CNTs) 和石墨烯等这类慢饱和吸收体是比较适配在这一类较短腔长的激光器中。这类以 SESAM 为主的慢饱和吸收体锁模技术是目前获得高重复频率皮秒飞秒激光的主

要方法。SESAM 是由一个饱和吸收体和一个反射镜组成。在腔内，当弱光经过 SESAM 时，弱光会被其吸收，当强的脉冲光经过 SESAM 时，其吸收能力低，会让强脉冲光穿过。随着时间的推移，只有强脉冲光得到了发展和增强，从而形成更短更强的脉冲。通过优化这类可饱和吸收体材料，激光器的性能也可以得到显著提升。除此之外，非线性放大环形镜锁模 (NALM) 和非线性偏振旋转锁模 (NPR) 在光纤激光器中也是获得高重复频率超短脉冲的主要锁模技术。NALM 技术原理是当光脉冲经过耦合器进入环形腔后会分成两个沿相反方向传播的光脉冲，利用环内增益光纤位置的非对称性，则两路光脉冲经历的非线性效应不同。当两脉冲在耦合器中相遇并发生干涉时，会产生强光高透、弱光低透的现象，从而实现锁模。NPR 技术利用不同偏振态的光经历不同的相位延迟，从而导致偏振态发生与光强有关的变化。偏振相关隔离器对特定偏振方向的光具有高透射率，通过调整偏振控制器角度，可使高强度脉冲的偏振方向与隔离器透射轴对齐，损耗低，而低强度背景光的偏振方向偏离透射轴，损耗大，实现强度相关损耗调制，压缩脉冲，形成超短脉冲。

目前基于半导体可饱和吸收体 (SESAM)、碳纳米管 (CNTs)、NALM 和 NPR 的锁模光纤激光器已经取得了一些实际性的进展。如表 1 所示列出了一些近年来被动锁模光纤激光器。

表 1 被动锁模光纤激光器

研究单位	锁模器件	重复频率/GHz	脉冲宽度	年份	参考文献
东京大学	CNTs	5	680fs	2005	[21]
上海大学	CNTs	9.25	975fs	2025	[22]
山东大学	SESAM	5	3.86ps	2021	[23]
南方科技大学	SESAM	1.048	144fs	2022	[24]
华南理工大学	SESAM	2	126fs	2019	[25]
中国科学院	SESAM	2.68	244fs	2019	[26]
华南理工大学	SESAM	12.5	1.9ps	2019	[27]
北京大学	NALM	0.5	84.4fs	2017	[28]
北京大学	NALM	0.5	153fs	2011	[29]
上海理工大学	NPR	1	48.8fs	2024	[30]
北京大学	NPR	1.2	38fs	2024	[31]

早在 2005 年 shinji 等在东京大学第一次利用碳纳米管作为锁模器件搭建了一台被动锁模光纤激光器，并且实现了重复频率达到 GHz 以上的脉冲输出，产生了重复频率为 5GHz，脉冲宽度为 680fs 的激光脉冲输出^[21]。2025 年上海大学设计了一种薄膜单壁碳纳米管作为锁模器件，利用谐波锁模技术，搭建了一台重复频率为 9.5GHz，脉冲持续时间为 975fs 的光纤激光器^[22]。2021 年山东大学搭

建了一台掺铒石英光纤激光器,采用SESAM锁模技术,能够得到重复频率为5GHz,脉冲宽度为3.86ps的激光输出,这是当时1.5 μm 掺铒石英光纤SESAM锁模激光器的最高重复频率^[23]。2022年南方科技大学展示了一种基于SESAM锁模的GHz飞秒掺Yb环形腔光纤激光器。能够得到重复频率为1.048GHz,脉冲宽度为144fs的激光输出^[24]。2019年华南理工大学报告了一种2 μm 高重复频率全光纤飞秒激光器,能够得到重复频率为2GHz,脉冲宽度为126fs,平均功率为8W的激光输出^[25]。同年中国科学院采用SESAM和掺铒光纤作为锁模器件,产生了重复频率为2.68GHz的激光脉冲输出^[26]。同年华南理工大学杨中民团队搭建了一台腔长仅为7.6mm的掺铒光纤激光器,实现了脉冲宽度为1.9ps、重复频率为12.5GHz的脉冲输出,是1 μm 波段最高重复频率光纤锁模激光器^[27]。

除此之外,国内一些关于NALM和NPR锁模光纤激光器也取得了一些进展。如表1所示,相较于SESAM、CNTs锁模技术,NALM和NPR锁模光纤激光器的输出激光的脉冲宽度有着较大的优势,重复频率方面优势有限。NALM锁模激光器虽然可以通过补偿腔内色散来实现飞秒激光输出,但是其腔内还需加入一定长度的光纤和相移器来实现锁模。这就不易将腔长进一步缩短,导致该类激光器的重复频率较低。NPR锁模激光器相较于NALM锁模激光器在重复频率方面可以进一步提升,但是这类激光器易受热影响,稳定性差。可以通过增添一些控温系统来提升该类激光器的整体性能,NPR锁模激光器在未来具有更好的发展潜力。

以SESAM为主的这类可饱和吸收体光纤锁模激光器相较于NALM和NPR光纤锁模激光器在重复频率方面有着巨大的优势。随着技术的发展,一些光学器件可以做到越来越小巧,那么这类SESAM锁模激光器的腔长就能做到越来越短,腔长完全可以达到毫米级甚至更小。但受自身材料寿命与工作带宽的限制,高重复频率SESAM锁模激光器容易因强脉冲光受损,并且该类激光器的输出脉宽也难以至飞秒量级。

随着新型可饱和吸收体的产生与优化、NALM和NPR技术的提升,对锁模光纤激光器的性能有着极大的影响。目前同时满足重复频率GHz级和脉冲宽度几十飞秒以内,对光纤激光器而言仍然较难。相信在不久的将来,会出现重复频率更高,性能更好的光纤激光器,并且高性能的锁模光纤激光器也将对众多应用领域有着重大影响。

2 固体锁模激光器

固体锁模激光器和光纤锁模激光器各有优劣。固体锁模激光器相较于光纤锁模激光器可以实现较高的输出功率,并且其可以通过选择不同的增益介质来实现更宽的波长范围。固体锁模激光器系统相对容易进行改进和扩展,能够适应多种腔体结构和技术。而如果需要激光器小型轻量化、光束质量好和长期稳定性高等优点,则光纤锁模激光器是更优的选择。目前重复频率GHz以上的超短脉冲固体激光器已在医学、军事以及工业应用上产生了显著影响。接下来将主要从主动锁模和被动锁模两个角度探讨固体激光器在超高重复频率超短脉冲激光领域的研究进展。

2.1 主动锁模固体激光器

主动锁模技术即通过对激光的振幅或相位进行调制,从而产生超短脉冲激光序列,进而实现锁模效果。早在1990年贝尔实验室就基于Nd:YLF晶体采用声光锁模技术,产生了重复频率为2GHz、脉冲宽度为7ps、平均功率为135mW的脉冲输出^[32],并在1992年在此实验上进行了优化,得到了重复频率为2.85GHz的锁模脉冲激光输出^[33]。1991年Ferguson课题组第一次利用频率调制技术,实现了Nd:YAG激光器的稳定锁模运转,获得了重复频率为1GHz,脉冲宽度为12ps,平均功率为162mW的脉冲输出^[34]。随着研究的深入,谐波锁模技术在固体激光器中也得到了发展。1991年Godil等采用谐波锁模技术,实现了重复频率为20GHz,3.9ps的Nd:BEL激光器^[35]。林肯实验室在1991年也基于Nd:YLF晶体实现了主动锁模,实现了重复频率为5GHz的脉冲输出^[36]。1994年天津大学精密仪器系实现了一种新型的非腔长匹配相干叠加脉冲锁模Nd:YAG激光器的锁模运转,锁模脉冲宽度可达到60ps,其脉冲宽度比普通主动锁模Nd:YAG激光器短三倍以上^[37]。虽然采用谐波锁模的方法可以得到较高重复频率的脉冲输出,但是这种激光系统也极其不稳定。随着被动锁模技术的成熟,研究人员们发现相较于主动锁模技术,被动锁模技术更容易产生重复频率GHz以上超短脉冲输出。

2.2 被动锁模固体激光器

目前在被动锁模固体激光器中,最常见的两种技术是SESAM(半导体可饱和吸收镜)锁模和克尔透镜锁模。克尔透镜锁模是利用介质的自聚焦效应和非线性光学特性来实现脉冲激光的。随着

激光二极管 (LD) 技术的不断进步, 现如今固体激光器的研究通常采用 LD 作为泵浦源。这种设计使得固体激光器具备了成本低廉、体积紧凑和使用寿命长等显著优势。这类由激光二极管泵浦的固体激光器, 也称为全固态激光器。

2.2.1 SESAM 锁模固体激光器

在超短脉冲锁模固体激光器中主要使用 Nd^{3+} 和 Yb^{3+} 掺杂的增益介质。 Nd^{3+} 掺杂的多种晶体主要用于产生高重复频率的皮秒激光, 而 Yb^{3+} 掺杂的晶体则更适合于输出高重复频率的飞秒激光。高重复频率皮秒激光对脉冲宽度的要求相对宽松, 通常不需在腔内增加额外的元件来调节色散。因此, 基于 Nd^{3+} 掺杂晶体的高重复频率皮秒锁模激光器首先得到了成熟的发展, 并被广泛应用。

Krainer 等在 1999 年第一次基于 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体实现了 SESAM 锁模激光器^[38], 得到了 13GHz 重复频率的脉冲输出。当使用掺钛蓝宝石激光器泵浦时, 可以得到重复频率 13GHz、脉冲宽度 9.5ps、平均输出功率 310mW 的脉冲输出。当使用 LD 泵浦时, 可以得到重复频率 12.6GHz、平均输出功率为 198mW、脉冲持续时间为 8.3ps 的脉冲输出。该激光器的结构如图 2 所示。

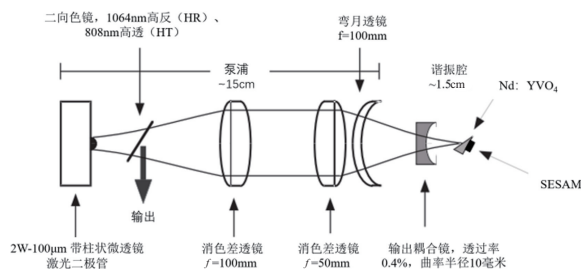


图 2 Krainer 等的 13GHz 皮秒激光器光路图^[38]

图 2 中所描述的激光器采用了简单的直腔设计, 其中一个端镜是部分透射的凹面镜, 可以增强光与增益介质的相互作用, 作为输出镜。在腔内, 还加入了一块倾斜的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体作为增益介质, 该斜角为布鲁斯特角, 该结构可以提高激光器的效率和稳定性。这种结构是一种可以得到高重复频率超短脉冲激光的简易方案之一。

同年此团队继续搭建了一台基于 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 增益晶体全固态激光器, 并且对增益晶体进行了改造。不仅缩短了晶体的长度, 还把晶体的一端改造为一曲面。并在此端镀上了具有输出率的介质膜, 所以晶体的这一端面即可作为一端镜, 而 SESAM 为另一端镜。通过对晶体的改造, 腔长得到了进一步缩短^[39]。该激光器结构如图 3 所示。

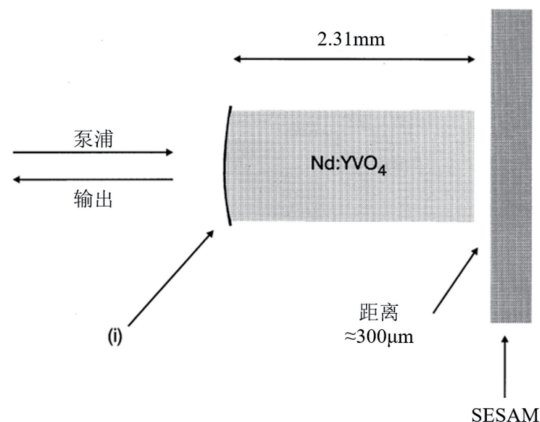


图 3 Krainer 等实现的 29GHz 皮秒激光器光路图^[39]

通过这种设计, 此团队得到了重复频率 29GHz、平均功率 81mW、脉冲宽度 6.8ps 的脉冲输出。在此结构中, 增益晶体的一面被直接用作输出镜, 这大大简化了腔体设计, 为后续进一步缩短腔长打下了坚实的基础。2000 年, Krainer 等继续在这一结构的基础上, 再次缩短了增益晶体的长度, 激光器产生了 59GHz 重复频率、平均功率 30mW、脉冲宽度 4.8ps 的脉冲输出^[40]。2002 年, 此团队再次缩短了增益晶体的长度, 将脉冲激光的重复频率做到了 160GHz^[41]。这创造了当时固体皮秒激光器的最高重复频率记录。虽然这类结构设计可以产生很高的重复频率的超短脉冲激光输出, 但是由于这种激光器的设计其为了获得锁模条件, 需要减少晶体上的饱和通量, 为了减少饱和通量, 就需要减少腔模面积, 从而导致激光输出的功率太低, 这大大地限制了该激光器的应用范围。而且这些激光器均采用了从输出镜外部入射的泵浦结构, 在这种设计中, 泵浦光会直接照射到 SESAM 上, 从而导致较为显著的热效应, 这影响了激光器的长期稳定运行。除了 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 锁模激光器的研究, 2002 年 Krainer 团队还实现了重复频率 10GHz 的 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{glass}$ 锁模激光器^[42], 并在几年时间内将此类激光器的重复频率提升至 25GHz^[43]、40GHz^[44] 和 50GHz^[45]。Zeller 等在 2007 年实现了 77GHz 的 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{glass}$ 锁模激光器^[46]。在 2010 年 Oehler 等实现了重复频率为 101GHz 的 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{glass}$ 锁模激光器^[47]。这类 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{glass}$ 锁模激光器已经达到了百吉赫兹以上的重复频率, 但是由于这种激光器的热导系数较低限制了其输出功率。2019 年, Cheng M Y 等展示了一种重复频率为 3.24GHz 的皮秒锁模激光器。该激光器结构将振荡器与单通放大器结合, 成功实现了较高的平均功率。并优化了泵浦结构, 在增益晶体前端放置一 45° 双色镜, 从而避免了泵浦光直接照射到 SESAM 上, 有效地

避免了由于SESAM过热影响激光器的稳定^[48]。该激光器在泵浦功率为29.6W时,其输出激光脉冲的平均功率为11.34W,总光-光效率约为38%,其24小时内的功率波动值小于0.6%,所以证明该激光器能够满足长期稳定运行,该激光器结构如图4所示。2023年苏黎世联邦理工学院展示了一台SESAM锁模Yb:YAG固体激光器,能够实现重复频率1.09GHz,脉冲宽度606fs,平均输出功率2.5W的激光输出。其所展示的是首个中心波长在1030nm附近重复频率超过1GHz的锁模Yb:YAG振荡器^[49]。2024年李志强等首次实现了基于Yb:YSr₃(PO₄)₃晶体被动锁模激光操作,在1062.7nm处产生了最短61fs的脉冲持续时间,平均功率为38mW^[50],重复频率为66.7MHz。

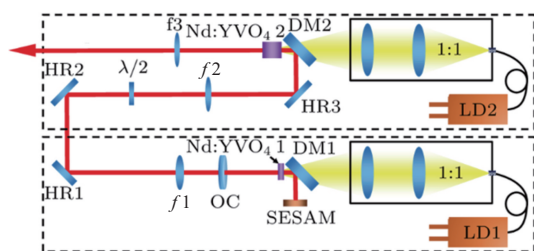


图4 Cheng M Y等实现3.24GHz高重复频率皮秒激光结构图^[48]

目前,SESAM仍然是应用最广泛且技术最成熟的锁模器件,但它也存在一些不足之处。由于SESAM受到半导体材料带隙的限制,其工作波长范围较窄,因此不适合用于宽带可调谐脉冲激光器。并且由于SESAM的制造工艺比较复杂、成本昂贵等缺点,这极大地限制了SESAM的应用。近年来,出现了一些新型的可饱和吸收体作为替代方案,其中包括石墨烯^[51]、氧化亚铁纳米粒子溶液^[52]和碳纳米管^[53]等可饱和吸收材料,它们具有带宽大、易于制造和低成本等特点,因此在固体激光器中具有广阔的应用潜力。

2.2.2 克尔透镜锁模固体激光器

除了SESAM锁模激光器,克尔透镜锁模也是实现高重复频率激光器的一种常见方法。其原理基于克尔效应,即激光光束在通过特定介质时,折射率与光强之间存在密切关系。当光束强度达到较高水平时,介质的非线性折射率会导致其表现出类似透镜的特性,从而对激光光束进行聚焦。这种聚焦效应会使光束的直径减小,进而引起腔内损耗的变化,这一过程就如同饱和吸收一样,促进了脉冲的锁模。通过调整激光腔内的条件,克尔透镜锁模能够有效地同步多个脉冲,从而产生高重复频率的短脉冲激光。这种技术在超快激光应用和各类科学实验中具有重要的意义,相较SESAM锁模,克尔透镜锁模也提供了一种灵活、

高效的手段来产生高能量和超短脉冲的激光。1992年Liu等利用二极管激光器抽运Nd:YAG晶体^[54],第一次展示了克尔透镜锁模,并产生了重复频率100MHz,脉宽8.5ps的脉冲激光。2009年,Wasylczyk等展示了首个克尔透镜锁模的掺镱全固态吉赫兹皮秒振荡器,其采用环形腔结构,该激光器结构如图5所示,得到了重复频率1GHz,脉宽0.2ps,平均输出功率114mW的锁模脉冲输出^[55]。2021年西安电子科技大学报道了一种重复频率为2GHz高功率克尔透镜锁模,采用Yb:KGW晶体,可以实现平均输出功率为746mW,脉冲持续时间为126fs的激光输出^[56]。2024年西北大学展示了一台高功率克尔透镜锁模Yb:CYA激光器,能够得到重复频率为1GHz,脉冲宽度为149fs,平均功率为11.1W的激光输出^[57],这是有史以来报道的飞秒锁模振荡器中的最高平均功率。2024年Fiehler等展示了第一台克尔透镜单片锁模掺钛蓝宝石激光器,在900mW输出功率下实现了创纪录的16.9GHz重复频率^[58]。

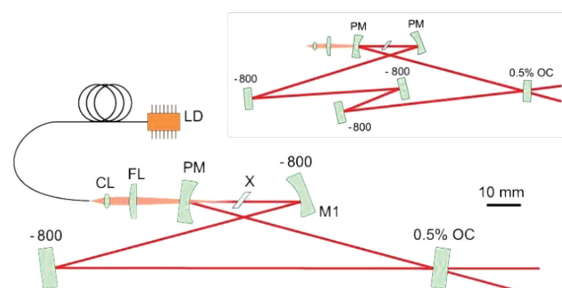


图5 Wasylczyk等展示的环形腔结构图^[55]

目前大部分克尔透镜锁模的激光器大部分的脉宽都是飞秒量级。但是由于克尔透镜锁模需要精确的对准和调节,以确保最佳的聚焦和锁模效果,这增加了操作的复杂性。并且在克尔透镜锁模激光器中,其增益晶体上的光斑尺寸较小,使得脉冲激光输出的平均功率偏低。目前,直接使用克尔透镜锁模激光器输出高重复频率激光脉冲时,平均功率通常难以超过10W,同时还面临结构复杂和成本高等一系列问题。对于输出功率低的问题可以采用高重复频率的皮秒振荡器作为种子源,并利用激光放大技术进行功率放大,这是实现高功率、高重复频率锁模激光输出的有效方法。

表2汇总了本文提及的部分代表性成果及其性能参数。从表中数据可看出,在光纤激光器范畴内,两类锁模技术的性能差异显著:主动锁模光纤激光器的脉冲宽度普遍较宽,多处于皮秒级别,百飞秒是其难以跨越的技术瓶颈;被动锁模光纤

表 2 GHz超短脉冲激光器综合性能对比表

激光器类型(光纤/固体)	锁模技术	增益介质	重复频率	脉冲宽度	平均功率	年份	参考文献
光纤	谐波锁模	掺铒光纤	30GHz	7.6ps	/	1990	[13]
光纤	谐波再生	掺铒光纤	10GHz	2.7ps	/	1994	[14]
光纤	主动锁模	掺钛光纤	10GHz	16ps	769mW	2018	[19]
光纤	CNTs被动锁模	掺铒光纤	9.25GHz	975fs	28.1mW	2025	[22]
光纤	SESAM被动锁模	掺 Tm ³⁺ 光纤	2GHz	126fs	8W	2019	[25]
光纤	NALM被动锁模	掺 Yb 光纤	0.5GHz	84.4fs	200mW	2017	[28]
光纤	NPR被动锁模	掺 Yb 光纤	1.2GHz	38fs	1W	2024	[31]
固体	声光锁模	Nd:YLF	2GHz	7ps	135mW	1990	[32]
固体	谐波锁模	Nd:BEL	20GHz	3.9ps	/	1991	[35]
固体	SESAM被动锁模	Nd:YVO ₄	59GHz	4.8ps	30mW	2000	[40]
固体	SESAM被动锁模	Nd:YVO ₄	3.24GHz	11.4ps	11.34W	2019	[48]
固体	SESAM被动锁模	Yb:YAG	1.09GHz	606fs	2.5W	2023	[49]
固体	克尔透镜锁模	Yb:KGW	2GHz	126fs	746mW	2021	[56]
固体	克尔透镜锁模	Yb:CYA	1GHz	149fs	11.1W	2024	[57]

激光器则恰好相反，能轻松生成飞秒级脉冲。不过在平均功率和重复频率上，主动锁模光纤激光器表现更优，优势十分明显，但这一优势建立在更复杂的结构之上——额外的驱动电路与精密调制器，直接推高了其整体成本。

再看固体锁模激光器领域，主动锁模与被动锁模的性能特点同样存在分化：主动锁模固体激光器的重复频率相对更高，但脉冲宽度较宽，基本停留在皮秒级别，受调制器频率的制约，很难突破1皮秒的限制。被动锁模固体激光器中，克尔透镜锁模激光器不仅脉冲宽度能达到飞秒级，重复频率更可提升至吉赫兹量级，同时，被动锁模固体激光器在平均功率方面，也具备相当显著的优势，重复频率方面也可以通过进一步压缩腔长来提高。

3 应 用

高重复频率超短脉冲激光器在材料加工、生物医疗、光学频率梳等方面都有较大的优势，下面将从几个方面简要介绍该类激光器的应用及前景。

3.1 材料加工

超短脉冲技术目前已逐步走向成熟，如今在工业界已经有了广泛的应用。不管是在硬性材料还是是一些易受温度影响的材料加工上，都能看到这类超短脉冲激光器的影子。如图6所示，与传统激光相比，这类皮秒飞秒激光能够在短持续时间内以最小的热影响进行加工，并能达到很高的精度，属于“冷加工”^[59]。GHz重复频率超快激光在精密加工领域具有极高应用价值，其脉冲串模式使得烧蚀冷却成为可能，可显著提高加工效率和加工质量^[5]。随着此类激光器的普及应用，功率与

重复频率之间的平衡问题逐渐成为突出的技术难点。不过，近年来激光放大技术的兴起与发展，为这一难题提供了有效的解决路径。2023年华南理工大学将种子光源经过多级放大技术，已经可以得到重复频率为1.39GHz，功率为1214W的输出激光^[60]，该激光系统结构如图7所示。

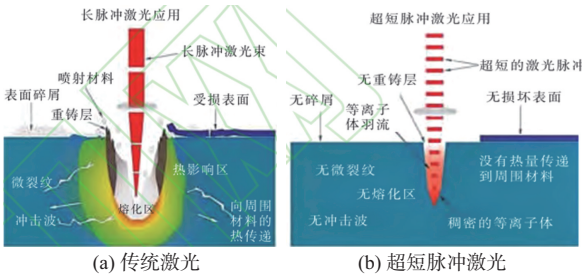


图 6 不同激光对材料加工的热影响^[59]

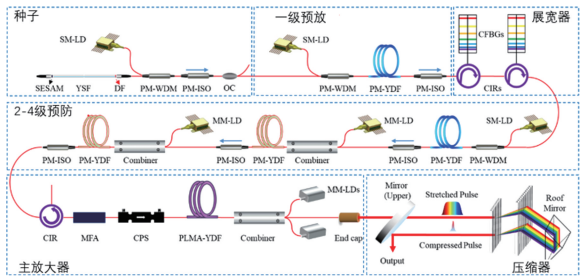


图 7 高重复频率高功率飞秒光纤激光系统^[60]

3.2 生物医学

在一些激光手术中，这类高重复频率超短脉冲激光器可快速扫描目标区域，减少对周围健康组织的辐射时间，从而降低一些炎症等不良反应。并且这类飞秒级的脉宽可避免传统激光的热凝固效应从而实现冷切割，目前在国内外的生物成像和眼科诊疗等领域，这类激光器的应用已十分普遍，成为提升手术精度与治疗效果的重要工具^[61,62]。在活体生物光学成像领域，目前各种先进

的光学成像技术都受限于由激光光束所引起的光漂白和光损伤,而高重复超短脉冲能够有效抑制荧光成像显微过程中激光光束导致的光漂白以及光损伤^[5]。2008年,Ji等在秀丽隐杆线虫幼虫的钙离子荧光成像实验中展开对比研究:当分别采用重复频率为80MHz与5.12GHz的光脉冲进行实验时,结果显示,5.12GHz光激发脉冲的光损伤阈值比80MHz光脉冲提升了6至20倍^[63]。2024年,华南理工大学与中山大学合作展示了一种基于GHz重复频率飞秒激光的双光子激发显微镜,对巨噬细胞行为进行长达数小时的活细胞成像,研究表明通过高重复频率调控可有效缓解高阶光漂白效应^[64]。在眼科领域,2024年Michael团队以猪眼为研究对象,分别采用皮秒激光与纳秒激光开展实验性手术,具体涵盖激光虹膜切开术、白内障治疗及囊切开术、选择性激光小梁成形术等。对比实验结果显示皮秒激光的表现更优,不仅显著提升了组织消融的精准度与整体手术质量,还大幅降低了对手术区域周围正常组织的不良影响^[65]。在皮肤科领域,2024年Diala等整合了皮秒激光在美容皮肤科的研究与临床数据,明确皮秒激光已成为美容皮肤科的重要治疗工具,在色素性疾病和瘢痕修复领域疗效明确可靠且安全性较高^[66]。在牙科领域,2014年Schelle等采用一功率为10W,脉冲宽度为8ps,波长为1064nm的Nd:YVO₄激光源对牙本质、釉质、陶瓷、复合材料和猛犸象牙进行测量。其结果表明这种超短脉冲激光提供了足够的消融速率,是牙科应用中有前景的技术^[67]。

3.3 光学频率梳

超短脉冲激光器是光学频率梳技术的核心光源,其为光梳的产生、稳定及应用提供了基础支撑。飞秒激光器通过驱动光梳技术的发展,正在不断突破传统技术的精度极限,成为现代精密测量、信息传输和量子技术的关键支撑。随着飞秒激光器向更高稳定性、更宽频谱、更小体积的发展,光梳的应用场景将进一步扩展至芯片级集成、深空探测、生物医学成像等更广阔的领域。

4 结 论

近些年来高重复频率超短脉冲激光器在研究和应用上都取得了卓越的进展。在重复频率方面,目前已经有做到上百吉赫兹,在脉冲宽度方面也都在迈向飞秒级别。在高重复频率—高功率权衡问题上,目前随着国内外放大技术的发展也得到了有效的解决,单脉冲能量也来到了焦耳级,平均输出功率也可以达到上千瓦。但是在成本、热效应、稳定

性等方面该类激光器还有较大的提升空间。目前随着一些新型可饱和吸收体材料的研究、激光二极管、光学元件工艺的不断发展,高重复频率超短脉冲激光器也在材料损伤阈值限制、系统集成度、热效应、稳定性等方面得到了极大的提升。

高重复频率超短脉冲激光器正站在实验室技术向产业应用转化的关键节点。展望未来,伴随晶体材料性能的迭代升级、集成光学技术的成熟完善以及温控系统的精准优化,这类尖端激光设备将在更多核心领域实现应用深化——从精密制造中的微纳结构加工,到生物医学领域的无创检测与动态成像,从量子通信中的高速密钥分发,到雷达系统的高分辨率探测,再到光梳技术在精密计量中的极致应用等,其应用边界正不断拓展。

不过,当前该技术的规模化落地仍面临多重挑战:热管理难题始终是高功率运行下的核心制约,增益介质的热积累会直接影响脉冲稳定性与输出质量;新材料体系的研发突破亟待加速,现有可饱和吸收体、增益介质的性能瓶颈(如损伤阈值、波长覆盖范围)尚未完全攻克,成本优化更是产业化进程中的关键障碍,SESAM和增益介质等核心器件的制造复杂性与进口依赖度仍需持续改善。目前德国BATOP公司是全球领先的SESAM生产商,SESAM制造技术壁垒较高,我国的SESAM需求主要依靠进口^[68],国内超短脉冲激光设备厂商(如科研级皮秒/飞秒激光器制造商)的高端需求几乎全部从该公司采购。2024年宋向阳等人指出尽管Yb³⁺、Er³⁺、Tm³⁺掺杂光纤均已实现商业化,然而高端特种光纤,如大模场光纤、高掺杂光纤、氟化物光纤等产量依旧小且品质也无达到国际先进水平,导致我国高端关键光纤材料的应用受制于人,必须依赖进口^[69]。期待未来在这些关键领域能取得突破性进展,为高重复频率超短脉冲激光器的广泛应用扫清障碍。

参考文献:

- [1] 张彩云,胡北辰,张志耀.超短脉冲激光加工技术在半导体制造中的应用[J].电子工艺技术,2024,45(06):1—4.
Zhang Caiyun, Hu Beichen, Zhang Zhiyao. Application of ultra-short pulse laser processing technology in semiconductor manufacturing[J]. Electronic Process Technology, 2024, 45(06):1—4.
- [2] 胡培鑫,姜新宇,聂子林,等.超短脉冲激光牙体硬组织切割应用的研究进展[J].全科口腔医学电子杂志,2020,7(04):9—11.
Hu Peixin, Jiang Xinyu, Nie Zilin, et al. Research progress on the application of ultrashort pulse laser dental hard tissue cutting [J]. Electronic Journal of General Dentistry, 2020, 7(04):9—11.
- [3] Garming M W H, Weppelman I G C, Lee M, et al. Ultrafast scanning electron microscopy with sub-micrometer optical pump resolution[J]. Applied Physics Reviews, 2022, 9(2):021418.
- [4] 谢琦然,李勇琪,吴舜.自由运行光纤激光器产生GHz光频

- 梳的模式过滤技术[J]. 光子学报 2024, 53(12):112—121.
- Xie Qiran, Li Yongqi, Wu Shun. Free-run fiber lasers produce GHz optical frequency comb pattern filtering technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(12):112—121.
- [5] 修昊, 陈学文, 温俊鹏, 等. 大功率GHz重复频率飞秒光纤激光技术及前沿应用[J]. 科学通报 2024, 69(Z2):4182—4196.
- Xiu Hao, Chen Xuewen, Wen Junpeng, et al. High-power GHz repetition rate femtosecond fiber laser technology and cutting-edge applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(Z2):4182—4196.
- [6] Chen X, Lin W, Hu X, et al. Dynamic gain driven mode-locking in GHz fiber laser[J]. Light: Science & Applications, 2024, 13(1):265.
- [7] Jiang J M, Chen X J, Gao Y X, et al. Bidirectional ultrahigh-repetition-rate ultrafast fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142: 07196.
- [8] 郑立, 田文龙, 马骏逸, 等. GHz重复频率亚百飞秒克尔透镜锁模Yb:CaYAlO₄激光器[J]. 物理学报, 2023, 72(06):177—183.
- Zheng Li, Tian Wenlong, Ma Junyi, et al. GHz repetition rate subfemtosecond Kerr lens mode-locked Yb:CaYAlO₄ laser[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(06):177—183.
- [9] 马骏逸, 赵国栋, 邵晓东, 等. GHz瓦级全固态克尔透镜锁模Yb:CYA飞秒激光器(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(10):113—119.
- Ma Junyi, Zhao Guodong, Shao Xiaodong, et al. GHz watt All-solid-state kerr lens mode locking Yb:CYA Femtosecond Laser (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):113—119.
- [10] Hamrouni M, Labaye F, Modsching N, et al. Efficient high-power sub-50-fs gigahertz repetition rate diode-pumped solid-state laser[J]. Optics Express, 2022, 30(17):30012—30019.
- [11] 刘翔翔, 张瑞康, 王欢, 等. 1.5- μm 波段25-GHz重频亚皮秒脉冲输出半导体锁模激光器(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(02):120—125.
- Liu Yuxiang, Zhang Ruikang, Wang Huan, et al. 1.5- μm Band 25-GHz repetitive Sub-picosecond pulsed output semiconductor Mode-locked laser (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(02):102—105.
- [12] Jin W, Yang Q F, Chang L, et al. Hertz-linewidth semiconductor lasers using CMOS-ready ultra-high-Q microresonators[J]. Nature Photonics, 2021, 15(5):346—353.
- [13] Takada A, Miyazawa H. 30 GHz picosecond pulse generation from actively mode-locked erbium-doped fibre laser[J]. Electronics Letters, 1990, 26(3):216—217.
- [14] Nakazawa M, Yoshida E, Kimura Y. Ultrastable harmonically and regeneratively modelocked polarisation-maintaining erbium fibre ring laser[J]. Electronics Letters, 1994, 30(19):1603—1605.
- [15] Ahmed Z, Onodera N. High repetition rate optical pulse generation by frequency multiplication in actively modelocked fibre ring lasers[J]. Electronics Letters, 1996, 32(5):455—457.
- [16] Yoshida E, Nakazawa M. 80~200GHz erbium doped fibre laser using a rational harmonic mode-locking technique[J]. Electronics Letters, 1996, 32(15):1370—1372.
- [17] Sarwar Abedin K, Onodera N, Hyodo M. Repetition-rate multiplication in actively mode-locked fiber lasers by higher-order FM mode locking using a high-finesse Fabry-Perot filter[J]. Applied physics Letters, 1998, 73(10):1311—1313.
- [18] Qin J, Dai R, Li Y, et al. 20 GHz actively mode-locked thulium fiber laser[J]. Optics Express, 2018, 26(20):25769—25777.
- [19] Ma W, Wang T, Wang F, et al. 2.07- μm 10-GHz repetition rate, Multi-wavelength actively Mode-locked fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 31(3):242—245.
- [20] Sun Y Duanmu Q, Wang T, et al. Actively mode-locked fiber laser at 2- μm for free-space data transmission with tunable repetition rate[J]. Optik, 2021, 236:166427.
- [21] 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.
- [22] Huang Q, Dai L, Zhang B, et al. Engineering carbon nanotube saturable absorber for boosting repetition rate in a harmonic Mode-locked GHz soliton fiber laser[J]. ACS Photonics, 2025, 12(2):1030—1038.
- [23] Gao X, Zhao Z, Cong Z, 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.
- [24] Ou S, Yu Z, 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.
- [25] Qiao T, Cheng H, Wen X, et al. High-power 2 GHz fs pulsed all-fiber amplified laser system at 2.0 μm [J]. Optics Letters, 2019, 44(2):6001—6004.
- [26] Song J, Wang H, Huang X, 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.
- [27] Wang W, Lin W, Cheng H, et al. Gain-guided soliton: scaling repetition rate of passively modelocked Yb-doped fiber lasers to 12.5GHz[J]. Optics Express, 2019, 27(8):10438—10448.
- [28] Liu G, Wang A, Zhang Z. 84-fs 500-MHz Yb: fiber-based laser oscillator mode locked by biased NALM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(23):2055—2058.
- [29] Wang A, Yang H, Zhang Z. 503MHz repetition rate femtosecond Yb: fiber ring laser with an integrated WDM collimator[J]. Optics Express, 2011, 19(25):25412—25417.
- [30] 赵子陈, 陈俊宇, 于涵, 等. 1GHz, 48.8 fs 高重复频率掺镱光纤飞秒激光器研究[J]. 光学技术, 2024, 50(1):48—53.
- Zhao Zichen, Chen Junyu, Yu Han, et al. 1GHz, 48.8 fs high repetition rate ytterbium doped fiber femtosecond laser[J]. Optical Technique, 2024, 50(1):48—53.
- [31] Wang Y, Yang R, Chen Z, et al. Generating 1.2 GHz, 38 fs stretched-pulse directly from a robust mode locked solid-state fiber laser[J]. Optics Express, 2024, 32(27):48925—48933.
- [32] Weingarten K J, Shannon D C, Wallace R W, et al. Two-gigahertz repetition-rate, diode-pumped, mode-locked Nd:YLF laser[J]. Optics Letters, 1990, 15(17):962—964.
- [33] Weingarten K J, Godil A A, Gifford M. FM mode-locking at 2.85 GHz using a microwave resonant optical modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(10):1106—1109.
- [34] Zhou F, Malcolm G P A, Ferguson A I. 1-GHz repetition-rate frequency-modulation mode-locked neodymium lasers at 1.3 μm [J]. Optics Letters, 1991, 16(14):1101—1103.
- [35] Godil A A, Hou A S, Auld B A, et al. Harmonic mode locking of a Nd:BEL laser using a 20-GHz dielectric resonator/optical modulator[J]. Optics Letters, 1991, 16(22):1765—1767.
- [36] Schulz P A, Henion S R. 5-GHz mode locking of a Nd:YLF

- laser[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(19):1502—1504.
- [37] 王清月, 沈家强, 许键, 等. 非腔长匹配相干叠加脉冲锁模激光器的实验研究[J]. *物理学报*, 1994, (08):1289—1294.
Wang Qingyue, Shen Jiaqiang, Xu Jian, et al. Experimental study on Non-cavity-length-matched coherently superposed pulse Mode-locked lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 1994, (08): 1289—1294.
- [38] Krainer L, Paschotta R, der Au J A, et al. Passively mode-locked Nd: YVO₄ laser with up to 13 GHz repetition rate[J]. *Applied Physics B*, 1999, 69(3):245—247.
- [39] Krainer L, Paschotta R, Spühler G J, et al. 29 GHz mode-locked miniature Nd: YVO₄ laser[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(14):1160—1161.
- [40] Krainer L, Paschotta R, Moser M, et al. Passively mode-locked picosecond lasers with up to 59 GHz repetition rate[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(14):2104—2105.
- [41] Krainer L, Paschotta R, Lecomte S, et al. Compact Nd:YVO₄ lasers with pulse repetition rates up to 160 GHz[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(10):1331—1338.
- [42] Krainer L, Paschotta R, Spühler G J, et al. Tunable picosecond pulse-generating laser with a repetition rate exceeding 10 GHz[J]. *Electron Lett*, 2002, 38(5):225—227.
- [43] Spühler G J, Golding P S, Krainer L, et al. C-band tunable 25 GHz passively mode-locked Er:Yb:glass laser[J]. *Electron Lett*, 2003, 39(10):778—780.
- [44] Zeller S C, Krainer L, Spühler G J, et al. Passively mode-locked 40-GHz Er:Yb:glass laser[J]. *Appl Phys B*, 2003, 76(7):787—788.
- [45] Zeller S C, Krainer L, Spühler G J, et al. Passively mode-locked 50-GHz Er:Yb:glass laser[J]. *Electron Lett*, 2004, 40(14):875.
- [46] Zeller S C, Südmeyer T, Weingarten K J, et al. Passively modelocked 77 GHz Er: Yb: glass laser[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(1):1.
- [47] Oehler A E H, Südmeyer T, Weingarten K J, et al. 100-GHz, 1.1-ps pulse train at 1.5 μm from a passively mode-locked Er:Yb:Glass laser[C]//Opt Comm. (ECOC). 36th European Conference and Exhibition on, IEEE:2010:1—3.
- [48] Cheng M Y, Wang Z H, Cao Y F, et al. High power diode-pumped passively mode-locked Nd: YVO₄ laser at repetition rate of 3.2 GHz[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(5):054205.
- [49] Seidel M, Pilat J, Lang L, et al. Ultrafast Yb: YAG laser oscillator with gigahertz repetition rate[J]. *Optics Express*, 2023, 31(21):34313—34324.
- [50] Li Z Q, Lin Z L, Zeng H J, et al. Continuous-wave and SESAM mode-locked operation of a Yb: YSr₃ (PO₄)₃ laser [J]. *Optics Express*, 2024, 32(3):3974—3979.
- [51] Jingliang H, Xiaopeng H, Jinlong X. Ultrafast mode-locked solid-state lasers with graphene saturable absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9):0900138.
- [52] Ma C, Peng J, Yang X, et al. All-solid-state mode-locked 1064 nm Nd: YVO₄ laser with Fe₃O₄ nanoparticles saturable absorber[J]. *Optics Communications*, 2020, 473:125979.
- [53] Bae J E, Mateos X, Aguiló M, et al. Multi-gigahertz mode-locked femtosecond Yb: KLuW waveguide lasers[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(11):2584—2589.
- [54] Liu K X, Flood C J, Walker D R, et al. Kerr lens mode locking of a diode-pumped Nd: YAG laser[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(19):1361—1363.
- [55] 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—5636.
- [56] Zheng L, Tian W, Liu H, et al. 2-GHz watt-level Kerr-lens mode-locked Yb: KGW laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 12950—12957.
- [57] Tao J, Tian W, Zheng L, et al. Kerr-lens mode-locked GHz-repetition-rate Yb: CYA laser with 11-W average power[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(24):7024—7027.
- [58] Fiehler T, Wittrock U. 17-GHz Kerr-lens Mode-locked monolithic ti: sapphire laser[C]//Advanced Solid State Lasers. Optica Publishing Group, 2024:AM1A.2.
- [59] 陶龙辉, 王勇, 冯杰才, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料超快激光加工研究进展[J]. *热加工工艺*, 2025, (14):89—111.
Tao Longhui, Wang Yong, Feng Jie, et al. Research progress on ultrafast laser processing of carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. *Thermal Processing Process*, 2025, (14):89—111.
- [60] Xiu H, Fan Y, Lin W, et al. 1200-W all polarization-maintaining fiber GHz-femtosecond-pulse laser with good beam quality[J]. *Optics Express*, 2023, 31(25):41940—41951.
- [61] Tian K, Xiang M, Wen X, et al. Tissue ablation with multi-millimeter depth and cellular-scale collateral damage by a femtosecond mid-infrared laser tuned to the amide-I vibration[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(2):2300421.
- [62] Xiao X, Gao C, Pang M, et al. Repetition rate tunable microjoule Yb femtosecond fiber laser for applications in ophthalmology[C]//Advanced Lasers, High-Power Lasers, and Applications XV. SPIE, 2024, 13232:1323204.
- [63] 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.
- [64] He B, Wang W, Wen J, et al. Behavioral dynamics of neuroprotective macrophage polarization in neuropathic pain observed by GHz femtosecond laser two-photon excitation microscopy[J]. *Journal of Biophotonics*, 2024, 17(6):e202400026.
- [65] Körber M, Fellinger J, Fritsche M, et al. Ophthalmic surgeries on post mortem porcine eyes with picosecond ultrashort laser pulses[J]. *Frontiers in Medicine*, 2024, 11:1345976.
- [66] Haykal D, Cartier H, Maire C, et al. Picosecond lasers in cosmetic dermatology: where are we now? An overview of types and indications[J]. *Lasers in Medical Science*, 2023, 39(1):8.
- [67] Schelle F, Polz S, Haloui H, et al. Ultrashort pulsed laser (USPL) application in dentistry: basic investigations of ablation rates and thresholds on oral hard tissue and restorative materials[J]. *Lasers in Medical Science*, 2014, 29(6):1775—1783.
- [68] 王旭, 王凌冬, 高思能, 等. 一种电控 InAs/GaAs 量子点范德华异质结 SESAM 结构: 中国, 202411071297.0[P]. 2024-12-31.
Wang Xu, Wang Lingdong, Gao Sineng, et al. A structure of electrically controlled InAs/GaAs quantum dot van der waals heterojunction SESAM: CN, 202411071297.0[P]. 2024-12-31.
- [69] 宋向阳, 唐国武, 董国平, 等. 我国关键有源光纤材料发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2024, 26(03):42—52.
Song Xiangyang, Tang Guowu, Dong Guoping, et al. Study on the development strategy of key active optical fiber materials in china[J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(03):42—52.