

全保偏光纤光学频率梳技术

刘婷婷¹, 郝强^{1*}, 曾和平^{1,2}

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与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 飞秒光学频率梳是当今激光技术领域的重要研究方向。近年来,得益于保偏光纤及器件制作工艺的持续进步,全保偏光纤超快激光器和光学频率梳发展迅速。从技术角度回顾了全保偏光纤光学频率梳的发展过程:首先,简要介绍了光学频率梳的原理、结构和关键组成,就锁模脉冲自启动等关键技术进行了讨论;其次,介绍了几种超短脉冲放大及压缩技术,包括啁啾脉冲放大、非线性放大及分离脉冲放大;随后,介绍了与载波相位偏频信号(f_0)锁定相关的超连续谱产生和自参考拍频探测技术,实验上获得了高达 40 dB 的 f_0 信号;最后,介绍了几种常用的锁定重复频率(f_r)和 f_0 信号的方法。

关键词 光纤光学; 光学频率梳; 全保偏光纤; 光纤激光器; 超连续谱; 频率锁定

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.120003

All Polarization-Maintaining Fiber-Based Frequency Combs

Liu Tingting¹, Hao Qiang^{1*}, Zeng Heping^{1,2}

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, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract The femtosecond optical frequency comb is becoming an increasingly valuable research field in laser optics. In recent years, all polarization-maintaining (PM) fiber-based lasers and optical frequency combs have achieved rapid growth owing to the continuous improvement of both PM-fiber and device fabrication technology. Herein, the development of all PM-fiber-based optical frequency combs is reviewed from a technical perspective. First, the basic principle, framework, and key components of an optical frequency comb are briefly introduced, and each key technology of the frequency comb, such as self-started mode-locking, is discussed. Second, several methods for pulse amplification and pulse compression are described, such as chirped-pulse amplification, nonlinear amplification, and divided-pulse amplification. Third, supercontinuum generation and self-referenced interferometry technology related to carrier phase offset(f_0) locking are introduced, and the f_0 signal with a signal to noise ratio (SNR) as high as 40 dB is experimentally demonstrated. Finally, the methods for locked repetition frequencies(f_r) and f_0 signals are illustrated.

Key words fiber optics; optical frequency comb; all polarization-maintaining fiber; fiber laser; supercontinuum; frequency locking

OCIS codes 060.2310; 060.2320; 060.2420

1 引言

飞秒光学频率梳,简称“飞秒光梳”或“光梳”,已成为激光技术领域继超短脉冲激光之后的又一重大突破。20世纪70年代,德国科学家 Hänsch 课题

组^[1]创造性地提出以超短脉冲激光为桥梁,连接微波频率和光学频率。直到2000年,美国科学家 Hall 课题组^[2]首次实现了超短脉冲激光器重复频率和载波包络频移的同时锁定,验证了 Hänsch 的构想,这标志着第一台飞秒光学频率梳的诞生。

收稿日期: 2018-06-07; 修回日期: 2018-06-13; 录用日期: 2018-06-20

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407100)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ150092)

* E-mail: qianghao@usst.edu.cn

Hänsch 和 Hall 两位科学家因在光学频率梳方面的卓越贡献,获得了 2005 年诺贝尔物理学奖^[3]。光梳的主要特点是频谱覆盖范围极广且单个谱线线宽极窄,相当于数十万台的相位相互锁定的窄线宽激光器共线同时输出,犹如一把超精细的频率“卡尺”。光梳为频率等参数的测量提供了高精度度、高准确度及高灵敏度的工具,大大促进了阿秒科学、光钟、天文观测、精密测量、量子操控及生命科学等领域的研究^[4-10]。

早期的光梳都是基于钛宝石飞秒激光器搭建而成。在钛宝石光梳实现不久之后,全固态激光器的飞速发展又将光梳频段进一步拓展至中红外,甚至远红外波段^[11-13]。然而,钛宝石或全固态激光器的光路结构复杂、体积庞大、需要水冷、运行条件严苛及成本昂贵,难以满足或适应应用场景需求。近十年,光纤光梳克服了钛宝石或全固态光梳在诸如散热及小型化等方面的技术瓶颈,并实现了 1.06, 1.55, 2.0 μm 等多波段覆盖^[12,14-19]。然而,由于光纤飞秒激光器具有高增益及高损耗的特点,光纤光梳本身会携带大量的噪声,相噪的抑制更多依赖于腔外电路反馈控制。

在 2013 年以前,光纤光梳大都是采用非保偏光纤,仅能在恒温恒湿的实验室环境运行,不适应外场应用环境。考虑到非保偏光纤激光器易受环境干扰及长期稳定性欠佳的问题,探索锁模激光器全保偏化,确保脉冲的非线性演化进程不受外界环境干扰,成为实现光梳长期连续稳定运转的核心问题。近五年,多个科研团队围绕可饱和吸收体(SESAM)^[20-24]、

非线性放大环境(NALM)^[25-28]及非线性偏振旋转(NPR)^[29-30]等全保偏光纤锁模技术进行了深入研究,并开展了车载、箭载及星载等环境下的可靠性和稳定性测试^[31-35]。

本文将沿着光纤光梳发展脉络,围绕相关技术展开介绍,包括激光锁模技术、功率放大与脉冲压缩技术、超连续谱展宽技术、 $f-2f$ 拍频探测技术,及 f_0 和 f_r 锁定技术。

2 光梳的基本原理

光梳光源的基础是一台锁模激光器,其输出脉冲在时域上表现为具有 fs 量级时间宽度的电磁场包络,在频域上表现为具有相等频率间隔(梳齿间隔等于激光脉冲重复频率)的梳齿序列^[36],如图 1 所示。激光器的有效腔长决定了脉冲在时域上的时间间隔 T_R 和激光器的重复频率 f_r :

$$f_r = 1/T_R = \frac{c}{n_c L}, \quad (1)$$

式中: c 为光速; n_c 为腔内传输介质的折射率; L 为几何腔长。在频域上,频率梳齿的间隔等于脉冲的重复频率。同样地, f_0 也可从两个度量因素来理解。在时域上, f_0 由载波包络相位 $\Delta\varphi_{ce}$ 决定:

$$f_0 = f_r \Delta\varphi_{ce} / 2\pi, \quad (2)$$

式中, $\Delta\varphi_{ce}$ 起源于脉冲群速度与相速度的失配。当脉冲在色散介质中传输时,脉冲包络信号以群速度传输而载波信号以相速度传输,群速度与相速度的失配导致载波信号的顶点位置与包络信号的峰值位置出现偏移,即被称为载波包络相位偏移。在频域

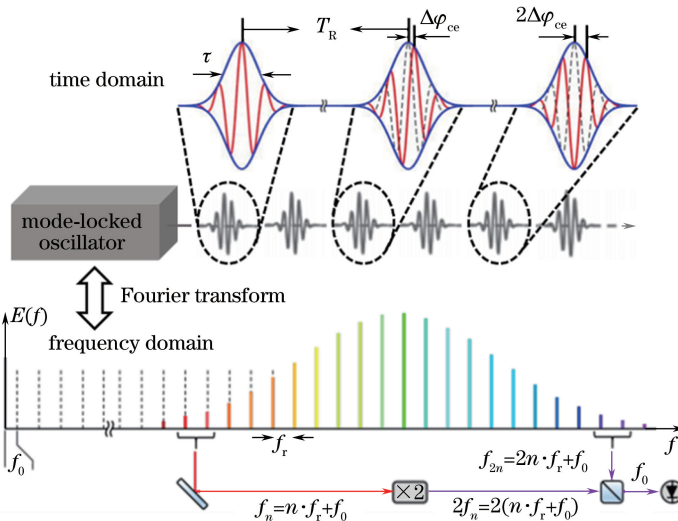


图 1 锁模脉冲序列时频域对应关系

Fig. 1 Fourier transform of the mode-locked laser in time and frequency domains

上, f_0 可以理解为梳齿序列中距离零点频率最近的频率齿, 即梳齿整体相对于零频的偏移。因此, 每根梳齿的频率均可表示为

$$f_n = nf_r + f_0, \quad (3)$$

式中, n 代表其模式序数。从(3)式中不难看出, 对于一台锁模激光器, 只要将 f_r 与 f_0 同时锁定, 就可以获得光梳。

3 光纤光梳的部件组成和关键技术

图 2 给出了光梳的框架图, 包括锁模激光器、光功率放大器、脉冲压缩器、超连续谱单元、 $f-2f$ 干涉

仪及 f_r 和 f_0 信号锁相环。上述部件的功能如下: 锁模激光器用于产生初始的低能量脉冲种子光; 光功率放大器将种子光脉冲的平均功率进行提升; 脉冲压缩器在时域上压窄脉冲宽度, 提升脉冲峰值功率; 超连续谱单元通过光子晶体光纤或高非线性光纤将脉冲光谱拓展至超过 1 个倍频程; 通过 $f-2f$ 干涉仪将超连续谱的低频成分倍频并与高频成分进行拍频, 结合光电探测器获取 f_0 信号; 在通过光电探测器探测 f_r 信号后, 将 f_r 和 f_0 与参考时钟源比较得到误差信号, 最后, 经电子电路处理反馈至锁模脉冲激光器的相应器件上。

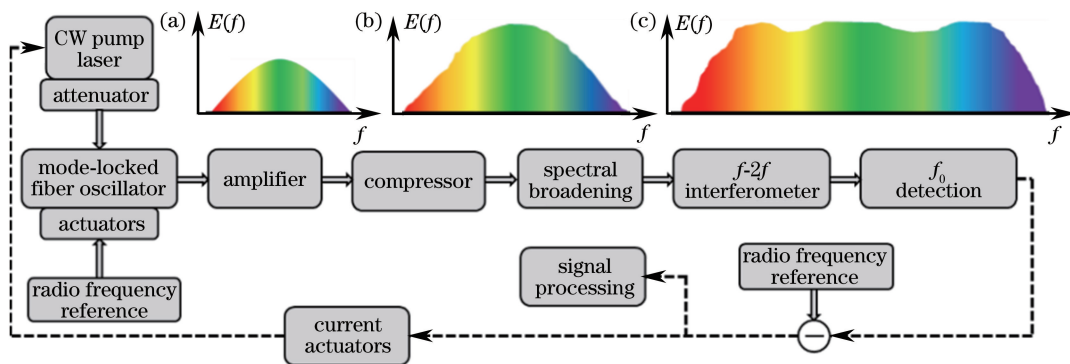


图 2 光学频率梳框架图。(a) 锁模激光器输出光谱; (b) 放大器输出光谱; (c) 超连续谱

Fig. 2 Typical framework of a frequency comb. (a) Output spectrum of mode-locked laser; (b) amplifier output spectrum; (c) supercontinuum spectrum

3.1 锁模脉冲光纤激光

光梳研究的首要问题是如何产生自启动、高稳定及低相噪的超短脉冲。被动锁模技术是获得超短脉冲输出的主要手段, 常用的有 SESAM、NPR 及 NALM 等锁模技术。从锁模机制上, NPR 和 NALM 可称为非实体可饱和吸收体 (ASA), 具有 fs 量级的恢复时间; SESAM、石墨烯 (Graphene) 及碳纳米管 (CN) 等材料可视为实体可饱和吸收体 (RSA), 一般具有 ps 量级的弛豫时间。这些锁模机制均是利用腔内某个器件或器件组合有选择性地对脉冲中心部分透过, 而对脉冲边缘吸收或者反射, 相当于脉冲宽度被动窄化, 最终在色散、增益、损耗、滤波及非线性等效应的共同影响下, 经过数千次循环后形成稳定的锁模脉冲^[37-38]。

就光纤锁模激光器来说, 先前的谐振腔大多采用非保偏单模光纤和非保偏光纤耦合器件。然而, 由于如圆度偏差及材料各向异性的微小起伏等内在因素的存在, 两个正交偏振态会发生随机耦合, 使得输出偏振态无规律。此外, 外界环境如侧面压力、径向拉力、温度变化及空气流动等都会影响光纤的双

折射, 扰动偏振态演化进程, 进而影响锁模激光器的稳定性。保偏光纤通过其内双折射, 几乎屏蔽了外界环境变化对光纤偏振本征态的影响^[39]。因此, 实现基于全保偏及全光纤结构的超短脉冲激光器是推动光梳走向实用化的关键。

高重复频率一直是光学频率梳的发展方向。但由于保偏光纤熔接设备的限制, 保偏光纤器件两端会分别带有 10 cm 长度的尾纤, 阻碍了全保偏全光纤激光器重复频率的进一步提升。尽管可以采用紧固封装的空间耦合器件有效缩短腔长, 但空间光路耦合调试难度大, 稳定性尚需验证。此外, 激光器重复频率的提升需要采用双向抽运方式提供足够的抽运强度, 在确保激光器能稳定自启动的前提下, 还要进行充分的抽运隔离和滤波以保护抽运源。值得注意的是, 在谐振腔很短时, 非线性放大环锁模方式难以累积足够的非线性相移, 锁模自启动也是需要解决的问题。因此, 全保偏光纤光梳重复频率的提升在成本、体积及可靠性方面仍有一段较长的路要走。

3.1.1 可饱和吸收体锁模

可饱和吸收体是一种具有光致吸收漂白特性的

材料。当入射光增强时,可饱和吸收材料逐渐变得“透明”,利用此特性可实现脉冲窄化。可饱和吸收体损耗较大,饱和强度较低,损伤阈值低,常结合反射镜(布拉格光栅层或金属膜)共同使用,构成 SESAM^[40]。采用 SESAM 锁模的光纤激光器常采用法布里-珀罗(F-P)型谐振腔结构,SESAM 既充当了可饱和吸收体,又起到腔镜的作用。这种腔型结构简单紧凑,搭建方便,易于集成。

2008年,美国 NIST 研究所 Ye 教授研究小组^[41]采用半空间半光纤振荡器结构结合光纤放大器,获得了 1.0 μm 波段、平均功率为 10 W、脉冲宽度为 75 fs、线宽小于 1 mHz 的光梳。2014年,美国 NIST 研究所 Sinclair 等^[31]采用可饱和吸收体锁模驻波腔结构研制的全保偏光纤光梳在振动平台和车载环境下能够稳定运行。同年,韩国科学技术研究院 Lee 等^[32]将一台基于饱和吸收体锁模环形腔的光纤飞秒激光器送入近地椭圆轨道,激光器连续稳定运转超过 1 年。随后,2015年,美国 NIST 研究所 Sinclair 等^[18]报道了 F-P 腔结构全保偏全光纤掺铒光纤光梳,重复频率约为 200 MHz, f_0 累积相位噪声为 2~3.6 rad [10 MHz, 6 Hz], f_r 累积相位噪声为 0.12~0.15 rad [0 MHz, 6 Hz], 系统稳定运行时长达 90 h。同年,中国科学院西安光学精密机械研究所 Feng 等^[42]研制了 SESAM 锁模的全保偏掺铒光纤光梳, f_r 与 f_0 锁定后的标准差分别为 91.7 μHz 和 2.5 mHz, 依公式 $[(91.5 \times 10^{-6} \times 3.85 \times 10^6)^2 + (2.5 \times 10^{-3})^2]^{1/2}$ 推算可知光梳的频率不确定度约为 350 Hz。2017年, Togashi 等^[43]在振荡器中加入了碳纳米管,实现了全保偏掺铒光纤光梳,锁定后 f_r 与 f_0 的线宽均降到 1 Hz 以下。

3.1.2 非线性偏振旋转

尽管采用可饱和吸收体锁模能够方便地实现脉冲自启动,但 SESAM 锁模的光纤光梳面临两个难题:第一,环境适应性,即可饱和吸收体的吸收特性与器件的工作温度密切相关,环境温度的变化使得激光器在冷启动或热启动时的差异较大;第二,光致损伤风险,可饱和吸收体长期工作在饱和阈值附近,SESAM 可能会在锁模启动瞬间或长期工作疲劳中失效。特别是,这两个问题在地面应用场景中尚能克服,但在星载等不允许出现部件失效的应用场景下,风险极大。此外,SESAM 的恢复时间通常比输出脉冲宽度长,这会引发较多的放大自发辐射连续噪声,会带来更多的背景噪声^[44]。

目前,非线性偏振旋转锁模已被广泛研究,结合

非线性演化、色散补偿、偏振控制及增益饱和等效应,产生了如脉冲串、孤子雨及孤子爆炸等有趣的光学脉冲现象^[45-47]。

NPR 锁模机制与光纤双折射效应密切相关,非保偏光纤组成的谐振腔容易受到环境扰动的影响,且偏振控制方式增大了系统的复杂度,不利于光梳的实用化。事实上,已有不少的实验研究尝试在保偏光纤中实现脉冲的非线性演化控制,其主要难点是在无实体偏振控制器的辅助下,如何方便、有效、精准地操控脉冲在保偏光纤纤芯内部的偏振演化,进而实现锁模启动所需的可饱和吸收特性。1993年, Fermann 等^[48]利用 90 cm 长的矩形保偏光纤(1.55 μm 处的拍长为 10 cm)在 F-P 腔中实现了 NPR 锁模。然而,该激光器仍需通过手动调整腔内器件来实现锁模,并且孤子锁模脉冲输出脉冲能量仅为 70 pJ。1996年, Jones 等^[49]在半空间半光纤结构的全负色散掺铒光纤环形腔中采用 NPR 锁模机制,通过强度调制器辅助脉冲启动,以带通滤波器控制孤子演化,实现了 5 GHz 重复频率的脉冲输出。2007—2014年,多个研究小组相继尝试了 1.06 μm 波段 F-P 腔结构的耗散孤子锁模方案^[50-53]。2016年,山东大学 Zhuo 课题组^[29]在半空间半光纤结构的环形腔中实现了重复频率为 43.8 MHz、中心波长为 1.03 μm 的锁模脉冲输出,通过在保偏光纤放大器两端进行两次 90° 角度熔接,抵消多段不同种类保偏光纤的双折射效应,确保脉冲在快慢轴分量的峰值能在时间轴上较好地重合。2017年, Szczepanek 等^[30]采用类似的方法实现了 20.5 MHz 掺铒锁模激光器的全光纤全保偏化。

采用角度熔接实现全保偏光纤 NPR 锁模仍有两个问题需要进一步解决:第一,激光器重复频率提升到 100 MHz 甚至更高时,光纤长度变短导致非线性相位累积不足时,是否还能实现锁模输出;第二,保偏光纤仅能隔离外界环境对本征偏振态的影响,但两正交本征态的温度折射率系数不同,因此,环境温度变化仍然会影响锁模状态的稳定性。

在 NPR 锁模的光梳研制方面,2002年,美国 NIST 研究所 Rauschenberger 等^[54]首次实现了呼吸脉冲锁模的光纤光梳,通过与钛宝石光梳比较,发现光纤光梳对抽运光强度的变化较为敏感,提出了采用反馈抽运光强度实现偏频锁定。2004年, Schibli 等^[55]通过将 f_0 和 f_r 锁定至氢钟参考源上实现了一套 turn-key 式的掺铒光纤光梳系统。2006年, NMIJ 研究所 Inaba 等^[56]将掺铒光纤光梳

的 f_0 。信号提高至 45 dB, 锁定后标准偏差为 9.3 Hz, 并用此光梳对 532 nm 的碘稳频激光器进行了频率测量, 万秒不确定度为 5.7×10^{-15} 。2007 年, 中国台湾标准局 Peng 等^[57]将 NPR 锁模掺铒光纤光梳 f_0 。信号的频率稳定度提升至 0.52 mHz (1 s 采样周期)。2010 年, 日本 Fukui 大学 Nakajima 等^[58]证实了光纤光梳能够实现 mHz 量级线宽和频率稳定度的传递, 1 s 不确定度为 3.7×10^{-16} , 万秒不确定度为 $(5 \sim 8) \times 10^{-19}$ 。2017 年, 中国科学院安徽光学精密机械研究所的吴浩煜等^[59]将掺铒光纤光梳的 f_r 和 f_0 。信号的标准偏差降至 0.65 mHz 和 1.76 mHz, 100 s 采样时间下的 Allan 偏差分别为 1.74×10^{-13} 和 1.8×10^{-11} 。

3.1.3 非线性放大环形镜

非线性光学环形镜 (NOLM) 通常采用 Sagnac 干涉仪结构, 其透射特性与入射脉冲的强度密切相关。

通过在 Sagnac 环中插入光放大器, 可构成 NALM。通常 NALM 锁模激光器由一线性臂和非线性环组成, 这两部分由一支光分束器连接。当脉冲从线性臂入射至非线性环后, 被光分束器分束生成正反向传输的两束光, 由光强差异产生相位累积差异, 从而在分束器重新合束时表现出不同的透射特性。当相位差为零时, 能量全部反射; 当相位差接近 π 时, 能量全部透射。NALM 机制表现出了与 SESAM 和 NPR 锁模机制类似的强度相关的透射规律。对光脉冲而言, 脉冲峰值部分较易实现 π 的相位差而透射, 脉冲两翼则由于光强较弱相移不足而被反射^[39]。NALM 的开关特性起源于非线性电极化, 输出脉冲可达 fs 量级。如图 3 所示, 依据腔型的不同, NALM 锁模激光器可分为“8”字形和“9”字形两种结构。差别在于“8”字腔锁模的相移累积需要接近 π , 而“9”字腔的锁模的相移累积需要接近 2π 。

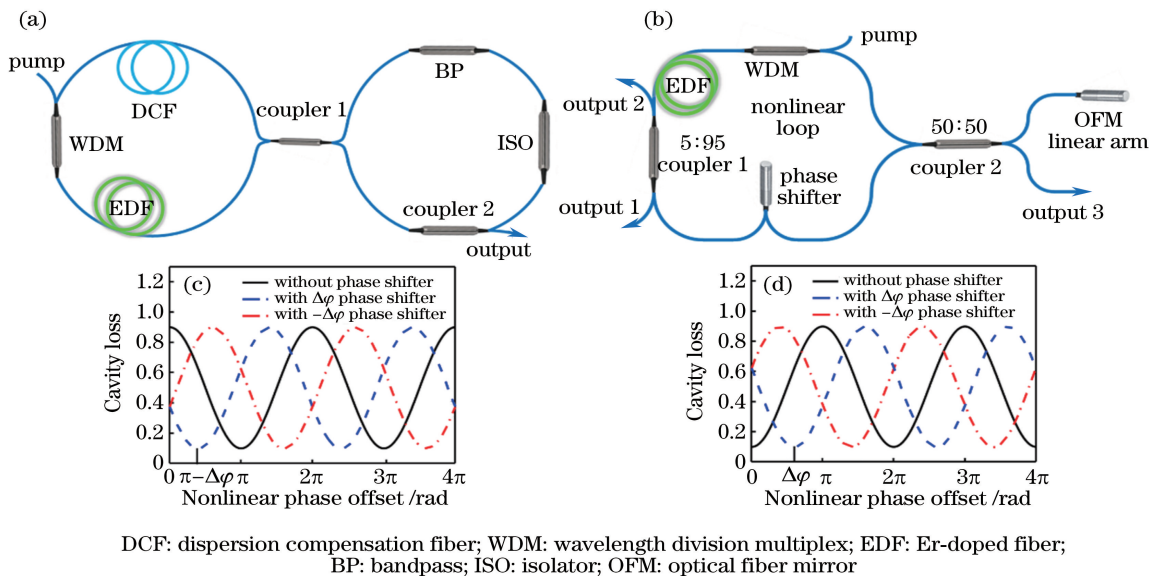


图 3 “8”字腔(a)和“9”字腔(b)的锁模激光器结构;“8”字腔(c)和“9”字腔(d)腔内损耗随非线性相位偏移的变化

Fig. 3 Mode-locked lasers structures of “8” cavity (a) and “9” cavity (b); the cavity losses versus the nonlinear phase shifts of “8” cavity (c) and “9” cavity (d)

1990 年, NALM 概念首次被 Fermann 等^[60]提出。1991 年, Duling^[61]采用该技术实现了掺铒光纤激光器锁模。与 SESAM 和 NPR 锁模技术发展类似, 早期 NALM 锁模光纤激光器通常采用非保偏光纤, 脉冲启动需配合偏振控制器才能实现, 稳定性欠佳。2012 年, Agueraray 等^[62]首次实现了“8”字腔结构的全保偏掺铒光纤锁模激光器, 重复频率约为 10 MHz。研究发现, NALM 锁模光纤激光器需要较高的抽运功率和较长的腔长, 才能获得足够的非线性相移^[63]。研究人员提出了在 Sagnac 环中

插入一个非互易线性相移的器件以降低锁模脉冲对非线性相移的需求, 从而降低抽运阈值和缩短腔长^[25-27, 64]。2016 年, Fermann 研究小组^[34]通过在 NALM 的非线性环内插入相位偏移器实现了掺铒光纤光梳, 载波包络相位噪声为 0.2 rad, 时间抖动为 40 as (10 kHz~10 MHz)。在实用化方面, 欧洲空间局与德国 Menlo systems 公司于 2015 年和 2016 年先后两次将基于 NALM 锁模的全保偏光纤光梳送入距离地面约 200 km 的热层, 用于比较零重力环境下两台不同种类的原子钟的差异, 期间, 光

梳经历了一系列的锁相和应用测试^[33]。

3.2 重复频率的锁定

激光器重复频率 f_r 主要与激光器几何腔长 L 和腔内介质折射率 n_c 有关。因此,要实现 f_r 锁定,可从对这两个量的控制入手。

3.2.1 压电陶瓷致动器

通过控制压电陶瓷致动器(PZT)伸缩量来调整激光器几何腔长 L 是锁定重复频率的常用手段,可采用将反射镜粘在 PZT 端面、将光纤粘在柱状 PZT 侧面、或将光纤缠绕在环形 PZT 侧面等方法实现^[65]。2015年,Feng等^[42]在全保偏掺铒光纤激光器中加入双 PZT(共振频率分别为 138 kHz 和 37 kHz)锁定重

复频率,锁定后 f_r 标准偏差为 91.5 μ Hz。

然而,以 PZT 方式控制重复频率的方法仍有不足之处。第一,PZT 存在固有的谐振频率、位移误差及非线性响应延迟;第二,PZT 需要配合高压驱动;第三,PZT 的反馈带宽通常在 500 kHz,高频噪声无法补偿^[66]。

3.2.2 电控偏振控制器

从侧面挤压光纤可改变光纤折射率,因此,结合电控偏振控制器(EPC)可实现对腔内介质折射率 n_c 的精密控制。2015年,华东师范大学沈旭玲等^[67]报道了采用 EPC 实现重复频率锁定的掺铒光纤激光器,实验原理图如图 4(a)所示。

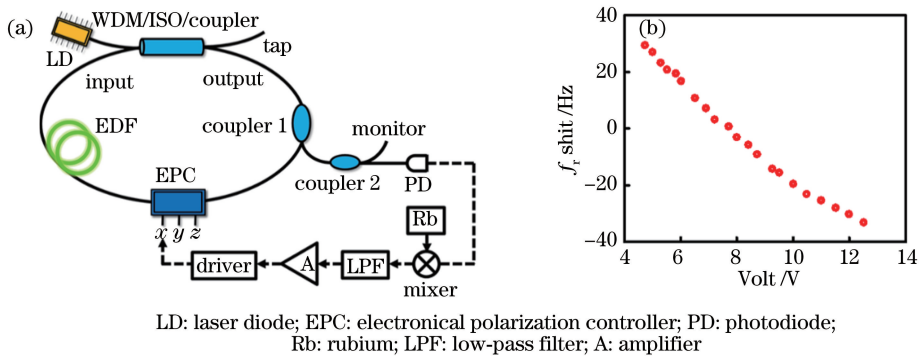


图 4 利用电控偏振控制器来锁定重复频率的实验。(a)实验装置示意图;(b)重复频率随 EPC 所加电压变化的频移

Fig. 4 Experiment for locking repetitive frequencies using an electronically controlled polarization controller.

(a) Schematic of experimental setup; (b) frequency shift of the repetition rate versus the voltage applied on the EPC

EPC 内部有三个互成 45° 角的光纤挤压器,理论上可实现任意偏振态输出。实验中,将 Y 轴和 Z 轴用于控制产生锁模脉冲,X 轴用于微调 and 锁定重复频率。图 4(b)表明重复频率与 X 轴上所加电压变化基本成线性关系,能实现 62 Hz 的重复频率控制。重复频率锁定后的均方根为 1.4 mHz,稳定度达 2×10^{-11} 。

3.2.3 电光调制器

电光调制器(EOM)通常用来抑制激光器重复频率的高频噪声^[58,68-69]。基于电光晶体的电压致折射率变化,可通过改变控制电压来改变晶体的折射率 n_c 。2005年,美国 NIST 研究所 Hudson 等^[70]首次在全保偏掺铒激光腔内加入 EOM,将脉冲的时间抖动降至 10 fs。2012年,Coq 等^[71]在全保偏掺铒光梳的振荡器中加入了 EOM,运用传递函数详细研究了抽运功率、腔内 PZT 及腔内 EOM 对激光器的输出功率、 f_r 及 f_0 信号的动态影响。EOM 可提供空间耦合或光纤耦合两种结构。空间结构的 EOM 需要很高的驱动电压,且反馈带宽有限。而光纤耦合的

EOM 使用方便,反馈带宽可达几十 MHz,驱动电压低,但通常会有约 2 dB 的插入损耗^[66]。

3.2.4 抽运功率调制非线性折射率

基于 Kramers-Krönig 关系可知,改变增益光纤上的抽运功率可改变激活离子的反转离子数,进而改变光纤折射率,这种技术被称为抽运功率调制非线性折射率技术或共振增强非线性技术。据此,研究人员采用该原理实现了光纤激光器的重复频率锁定^[72-74]。在不影响激光器锁模的前提下,在谐振腔内插入另一段掺杂增益光纤和波分复用器,通过调制加载至该掺杂光纤上的抽运光强度来改变该段增益光纤的非线性折射率,进而控制腔内介质折射率 n_c ,实现对整个激光器光学腔长的控制。该方法的好处是可利用高精度恒流源进行反馈控制。2016年,本课题组^[74]通过在全保偏放大环锁模激光器中采用抽运功率调制非线性折射率技术,获得了 $\pm 250 \mu$ Hz 波动范围的重复频率锁定结果,标准偏差低至 77 μ Hz(1 s 采样时间)和 24 μ Hz(10 s 采样时间)。研究发现,由于受到激活离子上能级寿命的

限制,该方法的控制带宽有限。以掺铒光纤激光器为例,该方法的控制带宽低于 500 Hz。此外,抽运功率的变化会通过再吸收效应使得锁定状态下激光器的输出功率发生变化。

3.3 光纤放大器

通常来说,锁模激光器的输出功率为 mW 量级,不能满足实际应用的需求。故通常采用多种放大技术将超短脉冲的输出能量提高至所需范围。

3.3.1 啁啾脉冲放大

啁啾脉冲放大技术能够抑制非线性效应,避免光致损伤,是获得高能量飞秒脉冲的有效手段。其基本思路为先将振荡器的输出脉冲通过色散元件进行时域展宽,再注入放大器中实现功率提升,最后通过色散补偿器件将脉冲压缩至 fs 量级。

啁啾脉冲放大技术早在 1974 年就已有报道^[75]。1985 年,罗切斯特大学 Strickland 等^[76]采用 1.4 km 长的单模光纤对 Nd:YAG 激光器输出脉冲进行时域展宽,最后获得了脉冲能量为 1 mJ、脉冲宽度为 2 ps 的高能量超短脉冲。在光纤光梳方面,Schibli 等^[41]采用长度为 30 m 的三阶反常色散单模光纤将振荡器输出脉冲展宽到 70 ps,有效抑制了脉冲放大时的非线性相位噪声,在光纤放大功率为 10 W 的情况下,光纤光梳与钛宝石光梳器保持了相近的相位噪声。2010 年,Ruehl 等^[17]通过采用啁啾脉冲放大结合多级光纤放大将 1.0 μm 波段光梳的平均功率提升到 80 W,是迄今为止功率最高的光梳。

啁啾脉冲放大过程中,增益窄化效应和高阶色散失配是限制脉冲峰值功率进一步提升的主要原因。其中,增益窄化效应限制了放大器输出脉冲的光谱宽度,限制了脉冲的变换极限宽度。此外,传输光纤、光栅及增益介质中的高阶色散累积也影响了压缩后飞秒脉冲的质量,通常表现为较大的脉冲基底。

3.3.2 自相似放大

与啁啾脉冲放大技术克服非线性效应的路径相反,自相似放大是利用脉冲在光纤放大过程中的非线性效应,突破放大过程增益窄化的限制,获得超短脉冲输出的方法。自相似放大会引入较强的线性啁啾,有利于后续的脉冲压缩。1993 年,Anderson 等^[77]发现在正色散区域具有抛物线形状的脉冲能进行自相似演化,实现无分裂地传输。通过自相位调制和正色散的共同作用,脉冲在频域和时域得以同时展宽^[78]。

2007 年,Papadopoulos 等^[79]在保偏大模场掺铒光纤中,以高阶非线性有效补偿了光纤的三阶色散,获得了脉冲宽度为 63 fs、峰值功率为 4.1 MW 的激光输出。2009 年,Lim 等^[80]在碳纳米管锁模掺铒光纤激光器的基础上通过自相似放大获得了 25 dB 的 f_0 信号,锁定后的相位噪声为 0.35 rad。2013 年,Lim 等^[81]通过预管理注入自相似放大器的种子脉冲啁啾量,克服了振荡器输出光谱宽度的不足,获得了 35 dB 的 f_0 信号。2016 年,华东师范大学 Liu 等^[82]在自相似放大系统中引入高阶色散控制技术,实现了 93.5 W 平均功率、33 fs 的脉冲输出,相应峰值功率为 51 MW。

3.3.3 分离脉冲放大

分离脉冲放大是近十年发展出的管理脉冲放大过程中非线性的新技术。它通过将入射脉冲分离成具有一定间隔的数个子脉冲,以子脉冲的数量来成倍降低放大器中的非线性效应。一般地,采用偏振分束晶体将入射脉冲分成若干个偏振正交的子脉冲,通过光放大器放大后,再通过偏振合束获得一个脉冲。如图 5(a)所示,采用级联 YVO₄ 晶体作为脉冲分离器,前后 YVO₄ 晶体的光轴相差为 45°。当线偏振脉冲的偏振方向与第一块 YVO₄ 晶体光轴成 45°角入射时,脉冲被等分为 o 光和 e 光,由于折射率的差异产生了偏振正交但有一定延迟的两个子脉冲。在经过 N 块晶体之后,原先的单个脉冲会被等分成 2^N 个子脉冲。这一做法相当于在时域上展宽了脉冲,降低了放大器中的非线性效应。2007 年,Zhou 等^[83]首次提出了分离脉冲放大概念。随后,又出现了分离脉冲线性压缩技术^[84-85]、分离脉冲非线性压缩技术^[86]及分离脉冲非线性放大与压缩技术^[87-88]等具体方案。

分离脉冲非线性放大与压缩技术指的是子脉冲通过具有非线性效应的增益介质,在获得能量放大的同时光谱展宽,而后,每个子脉冲可以在合成前进行独立压缩,或者在合成后进行整体压缩。子脉冲在放大过程表现出与自相似放大相同的特点,即光谱展宽和功率放大同时进行。放大器为入射脉冲提供了较高的增益,既能降低对入射脉冲能量的要求,同时也能突破增益窄化效应的局限,实现更宽范围的光谱及更窄脉冲输出^[89]。这种技术对于工作在 1.55 μm 波段的掺铒光纤放大器有显著优势。在 1.55 μm 波段,通过全光纤结构的预啁啾管理,可在负色散掺铒光纤放大器中同时实现功率放大、光谱展宽及脉冲压缩,这样就避免了光栅或棱镜压缩器

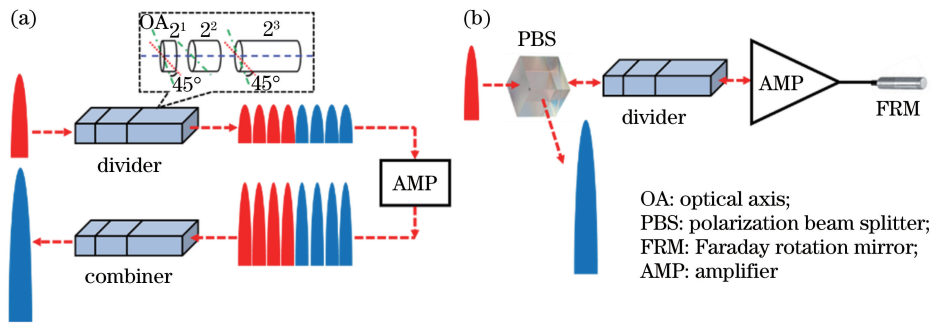


图5 分离脉冲放大的两种装置结构。(a)具有独立脉冲分离器与合束器的装置图;(b)利用偏振分束器及法拉第旋转镜的装置图

Fig. 5 Two experimental constructions of divided-pulse amplification.

(a) Structure with individual pulse divider and combiner; (b) structure with PBS and FRM

的使用,简化了系统装置。实验上,采用32脉冲分离,实现了最高平均功率为1.6 W、单脉冲能量为20 nJ、脉冲宽度为122 fs的脉冲输出。近50%的倍频效率说明脉冲具有极好的对比度,无脉冲旁瓣^[90-91]。更高功率的输出需要进一步抑制放大器中的自发辐射和自激振荡效应。

基于分离脉冲放大技术的780/1550 nm飞秒激光仪器,在脉冲宽度及平均功率等指标上逐渐逼近钛宝石激光振荡器,并在系统体积、使用成本、长期稳定及免维护性等方面具有独特优势。

3.4 超连续谱产生及自参考拍频探测技术

超连续谱产生单元是光梳的重要组成部分。如图1所示,当产生超过一个倍频层的光谱后,就可以利用 $f-2f$ 自参考技术将低频部分倍频并与高频拍频,产生 f_0 信号。另外,超连续谱还可用于光学相干断层成像术、受激辐射减损显微镜及密集波分复用光传送网等应用中^[92-95]。

3.4.1 超连续谱的产生

一般地,对于1 μm 波段的掺镱光纤激光器来

说,通常采用光子晶体光纤产生超连续谱。而脉冲压缩器和光纤耦合器等使得1 μm 波段光梳的结构变得较为复杂。对于1.55 μm 波段的掺铒光纤激光器来说,通常采用高非线性光纤产生超连续谱。1.55 μm 波段光梳的特点是可以进行色散补偿,易于实现全光纤化^[96]。

为获得高信噪比的 f_0 信号,通常需要产生高度相干的超连续谱。抽运的超短脉冲可能带有散粒噪声和较大的放大自发辐射,使得超连续谱的相干性变差,在频谱上表现为频谱整体的白噪声增加,降低了 f_0 信号的对比度。早期研究表明,用小于100 fs的超短脉冲去抽运略带负色散的高非线性光纤可以有效提高超连续谱的相干性^[97-100]。除了引入相位噪声外,在超连续谱产生过程中还会引入额外的振幅噪声。利用平衡探测器去探测 f_0 信号可减小振幅噪声的影响,增加 f_0 信号的信噪比^[66]。

本课题组开展了基于NALM锁模的全保偏掺铒光纤光梳的研制工作,超连续谱覆盖光谱范围为1000~2100 nm,如图6所示。

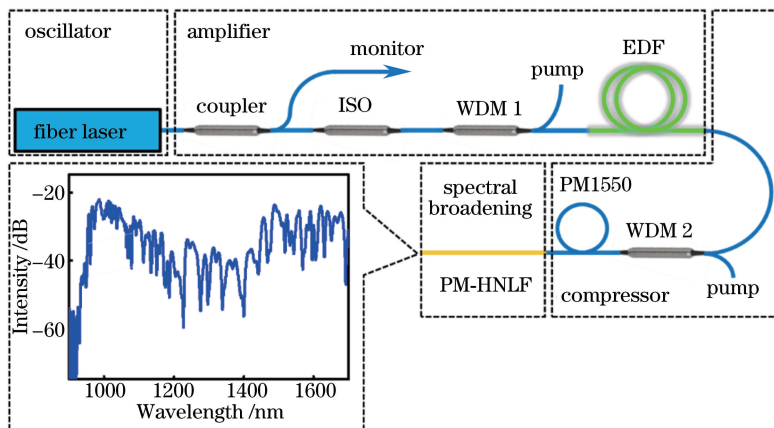


图6 基于NALM掺铒光纤激光器的超连续谱展宽

Fig. 6 Supercontinuum generation based on an Er-doped fiber laser mode-locked via NALM

3.4.2 自参考拍频探测技术

载波包络偏移频率 f_0 可以通过干涉法,如 $0-f^{[101-102]}$ 、 $f-2f^{[18, 31, 34]}$ 、 $2f-3f^{[103]}$ 、 $3.5f-4f^{[104]}$ 等拍频技术来实现。本研究主要介绍 $f-2f$ 自参考拍频探测技术。 $f-2f$ 自参考探测系统一般可分为非共线与共线两种结构。 $f-2f$ 拍频技术通过将超连续谱的低频成分倍频,并与相对应的高频成分在光电探测器上进行光学拍频,从而获得 f_0 信号:

$$f_0 = 2f_n - f_{2n} = 2(nf_r + f_0) - (2nf_r + f_0). \quad (4)$$

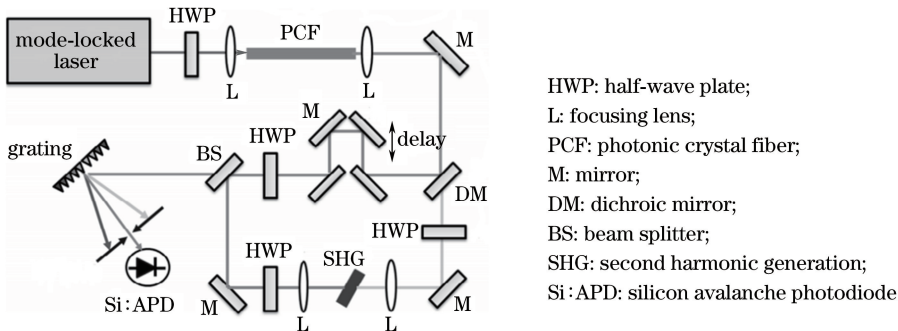


图7 非共线型 $f-2f$ 拍频探测装置

Fig. 7 Structure of non-collinear $f-2f$ interferometer

尽管上述非共线型 $f-2f$ 自参考探测系统两路光延时可控,但是,装置较为复杂,对光路准直及稳定性要求较高。此外,分束及合束过程引入的插损较大。

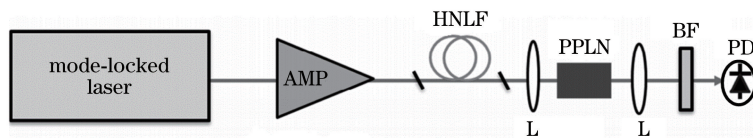
3.4.2.2 共线型 $f-2f$ 自参考系统

共线型自参考系统中基频光和倍频光始终保持

3.4.2.1 非共线型 $f-2f$ 自参考系统

在超连续谱的基础上,采用二向色镜将其中的长波部分和短波部分分束。长波部分经过倍频臂,短波部分经过延时臂,两束光在第二个分束镜上合束后再在光电探测器上干涉。通常,需要在光电探测器前放置带通滤波片以滤除杂散波提高 f_0 信号的信噪比。严格控制倍频光和基频光的时间与空间重合,可以在频谱仪的零频和重复频率之间发现 f_0 信号。

共线传输。掺铒光纤放大器产生的超连续谱进入周期性极化钽酸锂晶体 (PPLN) 内,其中,长波部分 2100 nm 倍频到 1050 nm,新产生的 1050 nm 倍频光与原有的 1050 nm 的基频光在光纤中共线传输至光电探测器。



AMP: amplifier; HNLF: high nonlinear fiber; BF: bandpass filter; PD: photodiode

图8 共线型 $f-2f$ 拍频探测装置

Fig. 8 Structure of collinear $f-2f$ interferometer

共线型 $f-2f$ 自参考系统装置简单,可采用保偏光纤耦合的 PPLN 晶体实现装置的全光纤化,有利于减小光梳体积,提高系统集成度和稳定性。但是,全光纤化带来的一个难题就是如何有效地控制两束脉冲光的延迟,以优化 f_0 信号。

3.5 载波包络相位偏频的锁定

载波包络相位偏频的锁定主要采用主动和被动两种方式。主动方式主要是利用上述自参考测量方法获得载波包络相位偏频信号后,主动反馈控制激光振荡器的条件,如调制抽运光功率等。被动方式主要是通过非线性差频消除两个同源脉冲的相位漂

移。该方法是将源于一台激光器的飞秒脉冲进行非线性频率变换,如光参量或超连续谱,选取谱带中的高频和低频进行光学差频,产生载波相位自稳定的超短脉冲。被动控制方法无需复杂反馈回路,但对飞秒激光器的功率要求高,且其频率锁定精度没有主动控制方法高。

f_0 信号的强度、位置及线宽等指标与振荡器腔内脉冲演化进程密切相关。通过控制振荡器的抽运功率^[12,34,68]和腔内脉冲的偏振态^[105],或利用声光移频器(AOFS)进行前馈控制^[106-107]均可实现 f_0 信号的锁定。

3.5.1 基于光学差频过程的 f_0 自稳定技术

基于光学差频原理,将同一台锁模激光器输出的不同频率成分 $\omega_1 = Nf_r + f_0$ 和 $\omega_2 = Mf_r + f_0$ 之间进行非线性光学差频,差频信号为

$$\omega_3 = (N - M)f_r, \quad (5)$$

式中, f_r 为激光器的重复频率, N 和 M 均为整数,且 $N > M$ 。由此得出的这个差频信号 ω_3 事实上就是一个载波包络相位偏移为零的光梳^[108-109]。

非线性差频实现超短脉冲载波位相自稳定的实验最早是基于 $\sim \mu\text{J}$ 单脉冲能量及 $\sim \text{kHz}$ 重复频率的钛宝石放大器实现的^[110]。在光子晶体光纤发明不久后,实现了基于高重复频率的钛宝石振荡器输出脉冲的载波位相自稳定^[102],并进一步拓展到光纤超快激光器上^[109,111]。这种被动控制方法的好处是不仅可以方便地进行频率变换,拓展到一些没有激光增益介质或是锁模器件的波段,比如中红外波段,而且可以将光梳齿结构方便地传递到所需的波段处。将光梳技术推进到红外波段,可实现对分子指纹光谱的快速、实时及高灵敏检测,为红外光谱遥感等重大应用提供新的高精度和高灵敏度光谱探测方法。2005年,美国 NIST 研究所 Foreman 等^[112]采用同源的两束超短脉冲(特殊设计输出耦合镜的钛宝石激光器,滤波出 670 nm 和 831 nm 两个波长)进行光学差频获得了 $10 \mu\text{W}$ 、 $3.39 \mu\text{m}$ 波长处的载波位相自稳定的中红外超短脉冲。同年,意大利 INO 研究所 Mazzotti 等^[113]报道了另一种结构的中红外产生装置,将两台分别为 850 nm 和 1064 nm 的连续光源锁定至同一台钛宝石光梳上,通过周期化铌酸锂晶体差频产生了 $170 \mu\text{W}$ 、 $4.2 \mu\text{m}$ 稳频激光。随后,该研究所采用 $1.06 \mu\text{m}$ 波段可调谐 ECDL 激光器与掺铒光纤光梳进行光学差频,进一步获得了中红外波段的可调谐光梳^[114-115]。

这种自稳定光梳的功率一般较小,需要后继放大器进行功率提升。另外,这种产生方法只能产生 f_0 为零的光梳, f_0 信号不可调谐^[36]。

3.5.2 基于锁相环技术的反馈式 f_0 控制技术

主动控制方法主要是利用锁相环技术锁定 f_0 信号。锁相环的基本组成包括压控振荡器、分频器、鉴频鉴相器及低通滤波器四个部分。基本工作原理如下:压控振荡器输出一个周期信号,该信号经过滤波放大及分频之后通过鉴频鉴相器与参考信号进行频率和相位比较,低通滤波后获得误差信号;将该误差信号反馈至压控振荡器及被控制单元即可实现对整个系统的反馈控制。

对于 f_0 信号锁定,一种方法是通过锁相环控制振荡器的抽运功率实现。2004年, Washburn 等^[12]首次采用抽运功率调制的方法实现了对掺铒光纤激光器载波包络偏移频率的精确锁定,锁定后 f_0 的标准偏差为 57 mHz。2009年, Baumann 等^[68]通过抽运功率反馈,成功锁定了 8 字腔的 f_0 信号,实现了一套完整的基于 8 字腔锁模激光器的掺铒光纤光梳。2016年, Kuse 等^[34]报道了基于 NALM 锁模的全保偏掺铒光纤光学频率梳。通过将 f_0 信号的变化反馈至振荡器的泵光和腔内的石墨烯上,利用泵光调节的慢速反馈和石墨烯的快速反馈来共同锁定 f_0 信号,最终将 f_0 的标准偏差降至 $460 \mu\text{Hz}$,在 $10 \text{ kHz} \sim 10 \text{ MHz}$ 范围内的时间抖动为 40 as,堪比钛宝石激光器,实现了掺铒光纤光梳的最好指标。

2012年,本课题组^[105]提出了通过控制脉冲在腔内的偏振演化实现对 f_0 信号锁定的方案。与控制 f_r 类似,在确保锁模状态的前提下,通过电控偏振控制器挤压光纤可实现对 f_0 信号的控制。实验结果表明,当控制电压从 550 mV 升至 580 mV 时, f_0 信号从 45 MHz 几乎线性增长至 120 MHz,控制范围大于重复频率。

运用反馈控制泵光锁定 f_0 信号的方式符合全保偏光纤化趋势,对于实际环境,特别是在对激光器长期稳定性十分敏感的星间/星地通信及星载光梳等领域有着明显优势,但其控制带宽受限于增益光纤的上能级寿命。一般来说,通过抽运光或偏振态调制 f_0 信号,其控制带宽均为 kHz 量级。当激光器自由运转线宽大于 100 kHz 时,高频噪声无法通过上述方法进行有效控制。因此,发展出了利用声光移频器消除高频噪声的方法^[106-107]。

3.5.3 基于声光移频器的前馈式锁定技术

2010年, Koke 等^[107]提出了基于声光频移器的前馈式 f_0 锁定技术,并应用在钛宝石激光器上,获得了 12 as 的时间抖动, f_0 噪声可以降低至量子噪声极限水平。

声光频移器的工作原理如图 9 所示,当携带 f_0 信号脉冲光入射进声光频移器后,零级衍射光未产生频移,而一级衍射光获得了数值等于声光频移器驱动频率 f_{drive} 的频移,但符号相反。如果将声光频移器的驱动频率设置为入射脉冲的载波相位偏频,即 $f_{\text{drive}} = f_0$,那么一级衍射光将自动实现偏频的抵消。2012年,本课题组^[116]采用声光移频技术实现了对光纤激光器载波包络偏移频率的精密锁定,锁定后累积相位

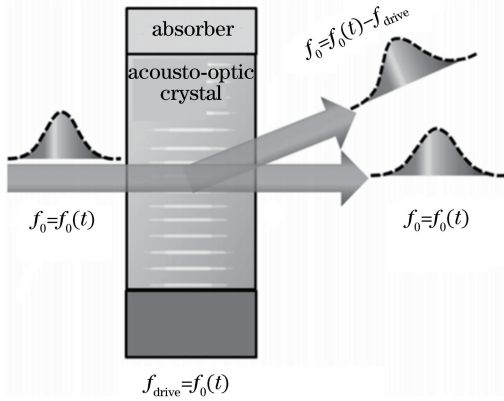


图9 声光移频器工作原理图

Fig. 9 Operational principle diagram of AOFS

噪声为 370 mrad, 时间抖动为 120 as。

4 总 结

随着光纤光梳系统及关键技术的不断突破, 光纤光梳的指标和性能日益提升, 并逐步向着实用化、小型化及高稳定的方向发展。近年来, 光梳技术越来越多地在频率标准计量以及前沿基础物理研究领域发挥重要作用, 如: 光学频率梳和原子钟的结合使光学频率标准的精度提高到 10^{-18} 量级; 基于光梳的频率高分辨特性, 光梳光谱仪被广泛应用于频率分析及测量^[117]; 借助高次谐波以及光参量变换等技术更是将光梳的波段拓展到了紫外和中红外波段。而中红外波段的双光梳光谱仪是研究表征气体分子特性的红外吸收谱的有力工具^[118-119]。在可预见的未来, 光梳技术还会在测距、遥感、生命科学及空间科学等领域大放异彩。

参 考 文 献

- [1] Eckstein J N, Ferguson A I, Hänsch T W. High-resolution two-photon spectroscopy with picosecond light pulses[J]. *Physical Review Letters*, 1978, 40(13): 847-850.
- [2] Jones D J, Dissams 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(5466): 635-639.
- [3] Wei Z Y. The 2005 Nobel prize in physics and optical frequency comb techniques [J]. *Physics*. 2006, 35(3): 213-217.
魏志义. 2005 年诺贝尔物理学奖与光学频率梳[J]. *物理*, 2006, 35(3): 213-217.
- [4] Kienberger R, Hentschel M, Uiberacker M, *et al.* Steering attosecond electron wave packets with light [J]. *Science*, 2002, 297(5584): 1144-1148.
- [5] Minoshima K, Matsumoto H. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(30): 5512-5517.
- [6] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, *et al.* An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level [J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 71-75.
- [7] Wu H Z, Zhang F M, Meng F, *et al.* Absolute distance measurement using frequency comb and a single-frequency laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(24): 2587-2590.
- [8] Jung K, Shin J, Kim J. Ultralow phase noise microwave generation from mode-locked Er-fiber lasers with subfemtosecond integrated timing jitter [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(3): 5500906.
- [9] Braje D A, Kirchner M S, Osterman S, *et al.* Astronomical spectrograph calibration with broad-spectrum frequency combs [J]. *The European Physical Journal D*, 2008, 48(1): 57-66.
- [10] Giorgetta F R, Swann W C, Sinclair L C, *et al.* Optical two-way time and frequency transfer over free space [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 434-438.
- [11] Diddams S A. The evolving optical frequency comb [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B51-B62.
- [12] Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, *et al.* Phase-locked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(3): 250-252.
- [13] Yang K W, Li W X, Yan M, *et al.* High-power ultra-broadband frequency comb from ultraviolet to infrared by high-power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 12899-12905.
- [14] Creeden D, Johnson B R, Setzler S D, *et al.* Resonantly pumped Tm-doped fiber laser with >90% slope efficiency [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 470-473.
- [15] Geng J H, Wang Q, Luo T, *et al.* Single-frequency gain-switched Ho-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3795-3797.
- [16] Leconte B, Cadier B, Gilles H, *et al.* Extended tunability of Nd-doped fiber lasers operating at 872-936 nm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 4098-4101.
- [17] Ruehl A, Marcinkevicius A, Fermann M E, *et al.* 80 W, 120 fs Yb-fiber frequency comb [J]. *Optics*

- Letters, 2010, 35(18): 3015-3017.
- [18] Sinclair L C, Deschênes J D, Sonderhouse L, *et al.* Invited Article: A compact optically coherent fiber frequency comb [J]. The Review of Scientific Instruments, 2015, 86(8): 081301.
- [19] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. High-power widely tunable Tm: fibre lasers pumped by an Er, Yb co-doped fibre laser at 1.6 μm [J]. Optics Express, 2006, 14(13): 6084-6090.
- [20] Liu X M, Lagsgaard J, Turchinovich D. Monolithic highly stable Yb-doped femtosecond fiber lasers for applications in practical biophotonics [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 18(4): 1439-1450.
- [21] Zhang L, Zhou J Q, Wang Z K, *et al.* SESAM mode-locked, environmentally stable, and compact dissipative soliton fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(13): 1314-1316.
- [22] Zou F, Wang Z K, Wang Z W, *et al.* Widely tunable all-fiber SESAM mode-locked Ytterbium laser with a linear cavity [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92: 133-137.
- [23] Szczepanek J, Kardaš T M, Michalska M, *et al.* Simple all-PM-fiber laser mode-locked with a nonlinear loop mirror [J]. Optics Letters, 2015, 40(15): 3500-3503.
- [24] Luo J, Yang S, Hao Q, *et al.* Precise locking the repetition rate of a SESAM mode-locking all polarization maintaining fiber laser [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206003.
罗浆, 杨松, 郝强, 等. SESAM 锁模全保偏光纤激光器重复频率的精确锁定 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206003.
- [25] Jiang T X, Cui Y F, Lu P, *et al.* All PM fiber laser mode locked with a compact phase biased amplifier loop mirror [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(16): 1786-1789.
- [26] Hänsel W, Hoogland H, Giunta M, *et al.* All polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation [J]. Applied Physics B, 2017, 123: 41.
- [27] Liu G Y, Ou S M, Chen K L, *et al.* Mode-locked oscillator-amplifier femtosecond pulse laser with bias phase shift nonlinear loop mirror [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0501011.
刘关玉, 欧尚明, 陈昆仑, 等. 基于偏置相移非线性环路反射镜的锁模振荡放大飞秒脉冲激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0501011.
- [28] Chen F H, Hao Q, Zeng H P. Optimization of an NALM mode-locked all-PM Er: fiber laser system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(23): 2119-2122.
- [29] Wang Y Z, Zhang L Q, Zhuo Z, *et al.* Cross-splicing method for compensating fiber birefringence in polarization-maintaining fiber ring laser mode locked by nonlinear polarization evolution [J]. Applied Optics, 2016, 55(21): 5766-5770.
- [30] Szczepanek J, Kardaš T M, Radzewicz C, *et al.* Ultrafast laser mode-locked using nonlinear polarization evolution in polarization maintaining fibers [J]. Optics Letters, 2017, 42(3): 575-578.
- [31] Sinclair L C, Coddington I, Swann W C, *et al.* Operation of an optically coherent frequency comb outside the metrology lab [J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6996-7006.
- [32] Lee J, Lee K, Jang Y S, *et al.* Testing of a femtosecond pulse laser in outer space [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5134.
- [33] Lezius M, Wilken T, Deutsch C, *et al.* Space-borne frequency comb metrology [J]. Optica 2016, 3(12): 1381-1387.
- [34] Kuse N, Jiang J, Lee C C, *et al.* All polarization-maintaining Er fiber-based optical frequency combs with nonlinear amplifying loop mirror [J]. Optics Express, 2016, 24(3): 3095-3102.
- [35] Li Y H, Kuse N Y, Rolland A, *et al.* Low noise, self-referenced all polarization maintaining ytterbium fiber laser frequency comb [J]. Optics Express, 2017, 25(15): 18017-18023.
- [36] Wei Z Y. Advances in ultrafast optics [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014.
魏志义. 超快光学研究前沿 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
- [37] Baumgartl M, Ortaç B, Limpert J, *et al.* Impact of dispersion on pulse dynamics in chirped-pulse fiber lasers [J]. Applied Physics B, 2012, 107(2): 263-274.
- [38] Li Y. Precise control of ultrashort pulse laser in the time and frequency domains [D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.
黎遥. 超短脉冲激光精密时-频域控制 [D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [39] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. New York: Academic Press, 1995: 195-211.
- [40] Keller U, Weingarten K J, Kärtner F X, *et al.*

- Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(3): 435-453.
- [41] Schibli T R, Hartl I, Yost D C, *et al.* Optical frequency comb with submillihertz linewidth and more than 10 W average power [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(6): 355-359.
- [42] Feng Y, Xu X, Hu X H, *et al.* Environmental-adaptability analysis of an all polarization-maintaining fiber-based optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17549-17559.
- [43] Togashi H, Nagaike T, Jin L, *et al.* All polarization maintaining optical frequency comb based on Er-doped fiber laser with carbon nanotube [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics: Science and Innovations 2017, May 14-19, 2017, San Jose, California United States. Washington: Optical Society of America, 2017: JW2A.60.
- [44] Kim J, Song Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(3): 465-540.
- [45] Tamura K, Haus H A, Ippen E P. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fibre ring laser [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(24): 2226-2228.
- [46] Matsas V J, Newson T P, Richardson D J, *et al.* Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(15): 1391-1393.
- [47] Hofer M, Fermann M E, Haberl F, *et al.* Mode locking with cross-phase and self-phase modulation [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(7): 502-504.
- [48] Fermann M E, Stock M L, Andrejco M J, *et al.* Passive mode locking by using nonlinear polarization evolution in a polarization-maintaining erbium-doped fiber[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(11): 894-896.
- [49] Jones D J, Haus H A, Ippen E P. Subpicosecond solitons in an actively mode-locked fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(22): 1818-1820.
- [50] Nielsen C K, Keiding S R. All-fiber mode-locked fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1474-1476.
- [51] Boivinet S, Lecourt J B, Cserteg A, *et al.* 3.3 MHz repetition rate all-fiber laser oscillator mode-locked by polarization rotation in PM fiber[C] // 2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference, May 12-16, 2013, Munich, Germany. New York: IEEE, 2013: 14252544.
- [52] Shen X L, Li W X, Zeng H P. Polarized dissipative solitons in all-polarization-maintained fiber laser with long-term stable self-started mode-locking [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(10): 101109.
- [53] Boivinet S, Lecourt J B, Hernandez Y, *et al.* All-fiber 1-m PM mode-lock laser delivering picosecond pulses at sub-MHz repetition rate [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(22): 2256-2259.
- [54] Rauschenberger J, Fortier T M, Jones D J, *et al.* Control of the frequency comb from a mode-locked erbium-doped fiber laser: Errata [J]. *Optics Express*, 2003, 11(11): 1345.
- [55] Schibli T R, Minoshima K, Hong F L, *et al.* Frequency metrology with a turnkey all-fiber system [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(21): 2467-2469.
- [56] Inaba H, Daimon Y, Hong F L, *et al.* Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb [J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5223-5231.
- [57] Peng J L, Ahn H, Shu R H, *et al.* Highly stable, frequency-controlled mode-locked erbium fiber laser comb [J]. *Applied Physics B*, 2007, 86(1): 49-53.
- [58] Nakajima Y, Inaba H, Hosaka K, *et al.* A multi-branch, fiber-based frequency comb with millihertz-level relative linewidths using an intra-cavity electro-optic modulator [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1667-1676.
- [59] Wu H Y, Shi L, Ma T, *et al.* Design and development technique for optical frequency comb based on femtosecond fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0601008.
吴浩煜, 时雷, 马挺, 等. 基于飞秒光纤激光器的光频率梳设计与研制技术 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0601008.
- [60] Fermann M E, Haberl F, Hofer M, *et al.* Nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optics Letters*, 1990, 15(13): 752-754.
- [61] Duling I N. All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(8): 539-541.
- [62] Agueraray C, Broderick N G R, Erkintalo M, *et al.* Mode-locked femtosecond all-normal all-PM Yb-doped fiber laser using a nonlinear amplifying loop

- mirror[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10545-10551.
- [63] Hao Q, Chen F H, Yang K W, *et al.* Self-started mode-locking with dispersion-imbalanced nonlinear amplifier loop [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(1): 87-90.
- [64] Guo Z R, Hao Q, Yang S, *et al.* Octave-spanning supercontinuum generation from an NALM mode-locked Yb-fiber laser system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1600507.
- [65] Jason Jones R, Diels J C, Jasapara J, *et al.* Stabilization of the frequency, phase, and repetition rate of an ultra-short pulse train to a Fabry-Perot reference cavity[J]. *Optics Communications*, 2000, 175(4/5/6): 409-418.
- [66] Droste S, Ycas G, Washburn B R, *et al.* Optical frequency comb generation based on erbium fiber lasers[J]. *Nanophotonics*, 2016, 5(2): 196-213.
- [67] Shen X L. Stability of ultra-fast pulses from fiber lasers [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
沈旭玲. 光纤超短脉冲激光器稳定控制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [68] Baumann E, Giorgetta F R, Nicholson J W, *et al.* High-performance, vibration-immune, fiber-laser frequency comb[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 638-640.
- [69] Zhang W, Lours M, Fischer M, *et al.* Characterizing a fiber-based frequency comb with electro-optic modulator [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(3): 432-438.
- [70] Hudson D D, Holman K W, Jones R J, *et al.* Mode-locked fiber laser frequency-controlled with an intracavity electro-optic modulator [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(21): 2948-2950.
- [71] le Coq Y, Zhang W, Santarelli G, *et al.* Investigation of an optical frequency comb with intracavity EOM and optimization of microwave generation[C]//2012 European Frequency and Time Forum, April 23-27, 2012, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE, 2012: 238-241.
- [72] Rieger S, Hellwig T, Walbaum T, *et al.* Optical repetition rate stabilization of a mode-locked all-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4889-4895.
- [73] Yang K W, Hao Q, Zeng H P. All-optical high-precision repetition rate locking of an Yb-doped fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(8): 852-855.
- [74] Hao Q, Zhang Q S, Chen F H, *et al.* All-optical 20- μ Hz-level repetition rate stabilization of mode locking with a nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(11): 2833-2837.
- [75] Fisher R A, Bischel W K. Pulse compression for more efficient operation of solid-state laser amplifier chains[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 24(10): 468-470.
- [76] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [77] Anderson D, Desaix M, Karlsson M, *et al.* Wave-breaking-free pulses in nonlinear-optical fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, 10(7): 1185-1190.
- [78] Liu X M, Mao D, Wang L R. Recent progress in investigation and application of dissipative soliton in fiber lasers[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(32): 3039-3054.
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.
- [79] Papadopoulos D N, Zaouter Y, Hanna M, *et al.* Generation of 63 fs 4.1 MW peak power pulses from a parabolic fiber amplifier operated beyond the gain bandwidth limit[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(17): 2520-2522.
- [80] Lim J, Knabe K, Tillman K A, *et al.* A phase-stabilized carbon nanotube fiber laser frequency comb. [J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 14115.
- [81] Lim J, Chen H W, Chang G Q, *et al.* Frequency comb based on a narrowband Yb-fiber oscillator: pre-chirp management for self-referenced carrier envelope offset frequency stabilization [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4531-4538.
- [82] Liu Y, Li W X, Luo D P, *et al.* Generation of 33 fs 93.5 W average power pulses from a third-order dispersion managed self-similar fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10939-10945.
- [83] Zhou S A, Wise F W, Ouzounov D G. Divided-pulse amplification of ultrashort pulses[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 871.
- [84] Kong L J, Zhao L M, Lefrancois S, *et al.* Generation of megawatt peak power picosecond pulses from a divided-pulse fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 253-255.

- [85] Lesparre F, Gomes J T, Délen X, *et al.* Yb:YAG single-crystal fiber amplifiers for picosecond lasers using the divided pulse amplification technique[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1628-1631.
- [86] Klenke A, Kienel M, Eidam T, *et al.* Divided-pulse nonlinear compression [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4593-4596.
- [87] Guichard F, Hanna M, Lombard L, *et al.* Two-channel pulse synthesis to overcome gain narrowing in femtosecond fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5430-5433.
- [88] Guichard F, Hanna M, Zaouter Y, *et al.* Analysis of limitations in divided-pulse nonlinear compression and amplification [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 619-623.
- [89] Yang K W, Hao Q, Zeng H P. Advances in ultrashort divided-pulse amplification systems (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 56-64.
杨康文, 郝强, 曾和平. 超短脉冲偏振分割放大技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 56-64.
- [90] Hao Q, Zhang Q S, Sun T T, *et al.* Divided-pulse nonlinear amplification and simultaneous compression [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(10): 101103.
- [91] Hao Q, Wang Y F, Liu T T, *et al.* Divided-pulse nonlinear amplification at 1.5 μm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 7101908.
- [92] Takayanagi J, Nishizawa N, Nagai H, *et al.* Generation of high-power femtosecond pulse and octave-spanning ultrabroad supercontinuum using all-fiber system [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(1): 37-39.
- [93] Chen Y W, Räikkönen E, Kaasalainen S, *et al.* Two-channel hyperspectral LiDAR with a supercontinuum laser source[J]. *Sensors*, 2010, 10(7): 7057-7066.
- [94] Rulkov A B, Vyatkin M Y, Popov S V, *et al.* High brightness picosecond all-fiber generation in 525-1800 nm range with picosecond Yb pumping [J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 377-381.
- [95] Kaminski C F, Watt R S, Elder A D, *et al.* Supercontinuum radiation for applications in chemical sensing and microscopy [J]. *Applied Physics B*, 2008, 92(3): 367-378.
- [96] Boyraz O, Kim J, Islam M N, *et al.* 10 Gb/s multiple wavelength, coherent short pulse source based on spectral carving of supercontinuum generated in fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(12): 2167-2175.
- [97] Corwin K L, Newbury N R, Dudley J M, *et al.* Fundamental noise limitations to supercontinuum generation in microstructure fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(11): 113904.
- [98] Newbury N R, Washburn B R, Corwin K L, *et al.* Noise amplification during supercontinuum generation in microstructure fiber [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(11): 944-946.
- [99] Nicholson J M, Yan M T. Cross-coherence measurements of supercontinua generated in highly-nonlinear, dispersion shifted fiber at 1550 nm [J]. *Optics Express*, 2004, 12(4): 679-688.
- [100] Dudley J M, Coen S. Coherence properties of supercontinuum spectra generated in photonic crystal and tapered optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1180-1182.
- [101] Han H N, Zhao Y Y, Zhang W, *et al.* Measurement of carrier-envelope phase of few cycles Ti:sapphire laser by difference frequency technique [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(5): 2756-2759.
韩海年, 赵研英, 张炜, 等. PPLN 晶体差频测量飞秒激光脉冲的载波包络相移 [J]. *物理学报*, 2007, 56(5): 2756-2759.
- [102] Fuji T K, Apolonski A, Krausz F. Self-stabilization of carrier-envelope offset phase by use of difference-frequency generation [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(6): 632-634.
- [103] Hitachi K, Ishizawa A, Nishikawa T, *et al.* Carrier-envelope offset locking with a 2f-to-3f self-referencing interferometer using a dual-pitch PPLN ridge waveguide [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1629-1635.
- [104] Reichert J, Holzwarth R, Udem T, *et al.* Measuring the frequency of light with mode-locked lasers [J]. *Optics Communications*, 1999, 172: 59-68.
- [105] Shen X L, Li W X, Yan M, *et al.* Electronic control of nonlinear-polarization-rotation mode locking in Yb-doped fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3426-3428.
- [106] Coddington I, Swann W, Newbury N. Coherent dual-comb spectroscopy at high signal-to-noise ratio [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(4): 043817.
- [107] Koke S, Grebing C, Frei H, *et al.* Direct frequency

- comb synthesis with arbitrary offset and shot-noise-limited phase noise[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 462-465.
- [108] Nakamura T, Ito I, Kobayashi Y. Offset-free broadband Yb: fiber optical frequency comb for optical clocks[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19376-19381.
- [109] Deng Y J, Lu F, Knox W H. Fiber-laser-based difference frequency generation scheme for carrier-envelope-offset phase stabilization applications[J]. *Optics Express*, 2005, 13(12): 4589-4593.
- [110] Baltuška A, Fuji T K, Kobayashi T. Controlling the carrier-envelope phase of ultrashort light pulses with optical parametric amplifiers [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(13): 133901.
- [111] Fehrenbacher D, Sulzer P, Liehl A, *et al.* Free-running performance and full control of a passively phase-stable Er: fiber frequency comb[J]. *Optica*, 2015, 2(10): 917-923.
- [112] Foreman S M, Marian A, Ye J, *et al.* Demonstration of a HeNe/CH₄-based optical molecular clock[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(5): 570-572.
- [113] Mazzotti D, Cancio P, Giusfredi G, *et al.* Frequency-comb-based absolute frequency measurements in the mid-infrared with a difference-frequency spectrometer [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(9): 997-999.
- [114] Maddaloni P, Malara P, Gagliardi G, *et al.* Mid-infrared fibre-based optical comb[J]. *New Journal of Physics*, 2006, 8(11): 262.
- [115] Malara P, Maddaloni P, Gagliardi G, *et al.* Absolute frequency measurement of molecular transitions by a direct link to a comb generated around 3- μm [J]. *Optics Express*, 2008, 16(11): 8242-8249.
- [116] Yan M, Li W X, Yang K W, *et al.* High-power Yb-fiber comb with feed-forward control of nonlinear-polarization-rotation mode-locking and large-mode-area fiber amplification [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1511-1513.
- [117] Wu Y J, Ye H Q, Han J, *et al.* Astronomical laser frequency comb for high resolution spectrograph of a 2.16-m telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0614001.
吴元杰, 叶慧琪, 韩建, 等. 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪的天文光学频率梳[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0614001.
- [118] Yang L, Shen X L, Yang K W, *et al.* Analysis and realization of adaptive dual-comb spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0514002.
杨力, 沈旭玲, 杨康文, 等. 自适应双光梳光谱原理分析与实现 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0514002.
- [119] Lu Q, Shi L, Mao Q H. Research advances in dual-comb spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0300001.
路桥, 时雷, 毛庆和. 双光梳光谱技术研究进展综述[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0300001.