

傅立叶域锁模光纤激光器的研究新进展

潘洪刚^{1,2}, 于晋龙¹, 杨秀峰², 王文睿¹, 杨恩泽¹

(1. 天津大学 电子信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072;

2. 天津理工大学 电子信息工程学院 薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

摘要:傅立叶域锁模(FDML)光纤激光器是目前激光领域中比较有活力的研究课题,有着巨大的应用前景。在介绍了FDML光纤激光器的发展状况和应用前景基础,论述了其基本原理,对其关键技术及多种新型技术方案做了介绍和比较,分析FDML光纤激光器的应用前景及发展趋势。

关键词:光纤激光器;傅立叶域锁模;法布里-珀罗滤波器;可调谐

中图分类号:TN248.1;TN929.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2011)08-0053-03

New development of fourier domain mode locking fiber laser

PAN Hong-gang^{1,2}, YU Jin-long¹, YANG Xiu-feng², WANG Wen-ru¹, YANG En-ze¹

(1. Laboratory of Optical Fiber communication, School of Electronics and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, School of electronic information, Key Laboratory of Film Electronics and Communication Tianjin, Tianjin 300384, China)

Abstract:Fourier Domain Mode Locking (FDML) fiber laser is now one of the most active subjects in the fields of the laser research and it will have a wide application for sure. Development and prospects of Fourier Domain Mode Locking fiber laser is introduced in this paper. The principles and critical technique of Fourier Domain Mode Locking fiber laser are discussed and several new methods are compared. The prospects of the development and application of the Fourier Domain Mode Locking fiber laser are analyzed.

Key words:fiber optical laser; fourier domain mode locking (FDML); Fabry-Perot filter; tunable

0 引言

锁模光纤激光器在超快光学、非线性光学、生物光学、光信息处理以及激光加工等领域具有重要的研究价值,进入90年代,人们对锁模激光器的理论和实验做了大量研究,在理论上提出了崭新的设计理念,例如主动锁模^[1]、谐波锁模^[2]、注入锁模^[3]、非线性光学环境锁模、非线性偏振旋转锁模^[4]、半导体可饱和吸收体锁模等一系列锁模理论。根据锁模原理将锁模光纤激光器分为主动锁模光纤激光器和被动锁模光纤激光器两大类。传统主动锁模光纤激光器两种调制技术分别针对激光器谐振腔内激光振幅、相位进行周期性调制,在实现端脉冲光源方面都获得很大的成功,而傅立叶域锁模(FDML)方式是对激光器谐振腔内激光的

收稿日期:2011-04-21。

基金项目:天津市自然科学基金(08JCYBJC14400)项目资助;国家自然科学基金重点(60736035)资助;973计划项目(2010CB327603)资助。

作者简介:潘洪刚(1979-),男,博士在读,讲师,主要从事光纤激光器方面的研究。

电子邮箱:phg022@163.com

波长(频率)进行周期性调制^[5],2006年,以傅里 FDML 方式实现了波长高速调谐的光纤激光器并给出了在光学相干成像(OCT)中的应用例子^[6-10]。

1 FDML 原理及特点

如图1所示,FDML激光器为光纤环状结构,光放大器作为增益介质,光纤法布里-珀罗(F-P)腔作为可调谐窄带光滤波器。通过在光纤激光器中的可调谐滤波器上加载周期性的电驱动信号(比如三角波或正弦波),可调谐滤波器中心波长实现周期性地扫描^[7]。

当可调谐滤波器中心波长扫描频率等于谐振腔基频的时候,这意味着所有可调谐滤波器扫描过的波长成分对应的时间窗口以扫描周期(即谐振腔周期 T_0 为时间间隔周

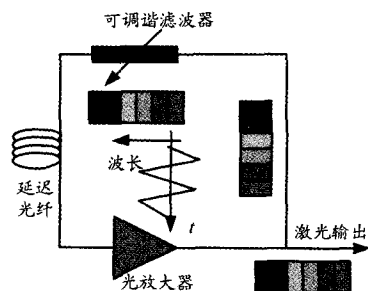


图1 FDML 光纤激光器原理图

潘洪刚, 于晋龙, 杨秀峰, 等: 傅立叶域锁模光纤激光器的研究新进展

期)性出现。从激光器开始工作, 可以观测到激光器输出端口; 如果滤波器波长扫描范围在光放大器增益带之内, FDML 光纤激光器输出时域连续的、波长随时间变化的激光; 如果滤波器波长扫描范围大于光放大器增益带, FDML 光纤激光器输出周期性的、波长随时间变化的激光脉冲。另外, 文献[7]中首次提出了 FDML 机制, 在改变调制频率的情况下, 时域调制频率, 在这种情况下产生的脉冲的重复频率是产生光脉冲的条件, 即满足 $f=(k+0.5)f_0, k=0,1,2,\dots$ 其中 f_0 是激光器的腔基频, 而 f 是激光器的调制信号频率的 2 倍。与传统主动锁模光纤激光器相类似, FDML 光纤激光器的调制频率也可以是激光器谐振腔基频的整数倍。由于一般的可调谐滤波器本身的调谐频率不能太高, 所以一般需要在 FDML 光纤激光器引入一段光纤作为延迟光纤来降低谐振腔的腔基频。FDML 光纤激光器的出现为波长高速调谐激光器提供了可靠的技术。从 FDML 的原理可知, FDML 光纤激光器的调制频率(即波长扫描频率), 只要满足和谐振腔基频的整数倍相等就可以获得 FDML 激光输出。然而, 这并不是意味着基于 FDML 光纤激光器技术就可以实现任何速率的波长高速调谐激光器。这里有两个问题需要注意, 第一、可调谐滤波器本身波长调谐速率的限制, 目前能达到几百千赫兹的量级; 第二个问题是激光器谐振腔的色散管理, 在搭建 FDML 光纤激光器时要考虑色散管理, 一般采用激光器工作波长接近零色散的色散位移光纤作为延迟光纤, 或者在谐振腔中加普通单模光纤作为延迟光纤的同时加上一段色散补偿光纤。

2 FDML 光纤激光器的技术方案

2006 年, MIT 小组^[9]最初提出了一种全新的扫频激光振荡机制—傅立叶域锁模技术。如图 2 所示, FDML 技术是利用几千米的长光纤, 大大地延长了谐振腔, 降低了腔基频, 使得光在长腔内传播一圈的时间刚好和 FFP-TF 的调谐时间匹配^[7]。光纤使得经 FFP-TF 滤出的各色光同时在谐振腔内振荡, 不需要像短腔那样, 某一个波长的光建立起振荡后才轮到下一个波长的光通过。因此, 尽管谐振腔的腔长长了, 速度反而提高了。因为扫频速度不再像短腔那样受限于滤波器的调谐速度和腔内色光建立激光振荡时间的长短, 而只受限于滤波器的调谐速度。这种 FDML 扫频激光光源最大优点是高速, 轴向扫描速度可达到几百千赫兹, 并且可获得超窄的瞬间线宽^[9]。

图 2 所示是结构最简单的 FDML 光纤激光器, 其

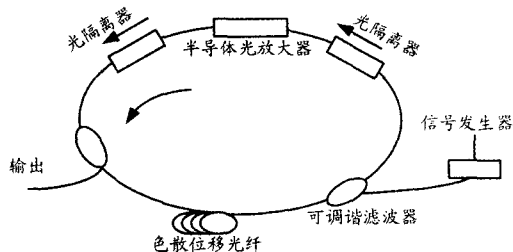


图 2 傅立叶域锁模光纤激光器结构图

锁模过程是: SOA 开始由于自发辐射出多纵模光, 多纵模光进入 F-P 腔经窄带滤波作用, 输出满足当前腔长的纵模, 其余模式被滤除, 腔内循环过程中, 输出的纵模再次进入 SOA 被放大, 最后通过 1:1 的输出耦合器输出一半能量, 其余的继续在腔内循环放大输出。F-P 腔的腔长按照扫描的周期变化, 使得允许通过的纵模不断变化, 实现可调谐输出的功能。扫描周期等于纵模绕腔一周的时间, 这样每个纵模在每次循环到达 F-P 腔时正好对应 F-P 腔的腔长变化到允许该纵模通过, 因此, 每个模式被精确锁定^[9]。

FDML 技术的长腔谐振结构因其高速扫频速度, 从而引起很多研究者的兴趣。MIT 研究小组^[9]之后提出了单向扫频的缓冲型 FDML 激光光源, 如图 3 所示。这种光源抑制前向扫描(波长从短到长), 实现只有后向扫描的单向扫描方式。单向扫描的优点是在不牺牲速度的前提下保持光谱的高度稳定性, 提高了系统动态范围和数据取样速度, 这种扫频激光光源轴向扫描速度达到 370kHz。加州大学的 Chen 小组^[10], 在一个长腔结构内并联两个 SOA, 扩大带宽到 135nm。与之前哈佛大学的研究小组不同的是, 他们只采用一个环形腔。MIT 研究小组^[11]用环形器和法拉第反射镜来实现光双程传播, 从而可以缩短一半的光纤长度, 并且来回在光纤内传播, 可消除光纤的双折射效应。韩国普山大学的研究小组将激光器中的增益介质替换为 EDFA 获得了实验的成功; Huber 小组还将喇曼放大器作为光放大器, 同样获得了实验的成功, 文献[12]中的

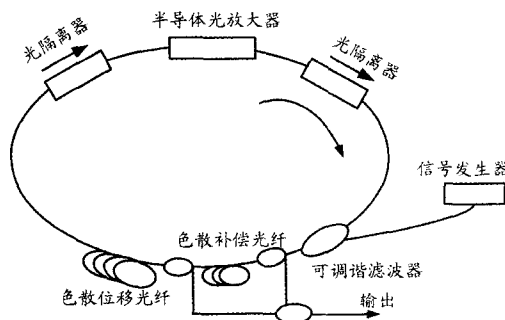


图 3 缓冲型单向扫描 FDML 激光器结构图

结构用 4 个 LD 作为泵浦源,每个 LD 的最高功率可达 150mW,并用喇曼增益光纤作为增益介质代替传统 FDML 光纤激光器中的损耗介质光纤延迟线,减小了整个环形激光腔中的损耗。

图 4 所示结构是喇曼增益放大器,它与 SOA 比较,以下几点好处:①喇曼散射可以避免 ASE,比基于半导体激光器的噪声性能会好一些;②与应用 SOA 相比较,两个泵浦二极管用 PBC 相连,降低了系统的偏振敏感性;③与并联 SOA 相比较,用喇曼放大器的增益带宽复用方式更容易获得更大的带宽。香港大学的研究小组^[13]将参量放大器与 EDFA 相结合,获得了 85.1mW 的功率输出和 200nm 的扫描带宽。可见,如果几种放大器结合得当,可以得到更大的扫描范围或者更高的输出功率。另外德国 Huber 小组^[14]于 2009 年提出了分谐波 FDML 技术,大大缩短了延迟光纤的长度,由传统的几千米缩短到几百米,并且扫频速度提高到 570kHz。

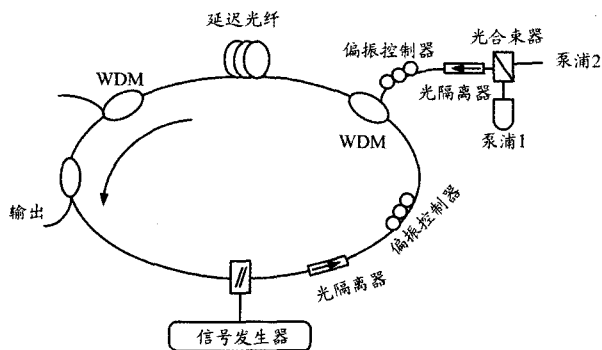


图 4 基于喇曼增益的 FDML 光纤激光器

3 存在问题

FDML 激光器技术发展已有五、六年的时间,各个研究小组提出了众多新颖结构,同时解决了诸多难题,并将其应用于相干层析摄影、光纤传感解调以及气体浓度测量等领域,但仍仍然存在一些问题:①FDML 激光器的调制速率受 PZT 机械响应速率的影响只能达到几百千赫兹,因此,寻找新的调制方法,使其调制速率更高,将是今后研究的一个重要课题。②虽然 Huber 小组提出并实现了分谐波 FDML 激光器技术,大大缩短了激光器的腔长,但其结构过于复杂,使激光在产生过程中有诸多问题,研制结构简单性、性能稳定的分谐波 FDML 激光器也是今后的一个方向。

4 结束语

随着光通信技术和新型光器件、光纤的研

制,在设计 FDML 光纤环形激光器时将有更多低损耗、优质的器件和光纤可供选择,比如应用新的结构减小环形激光器中延迟线的长度,以减小色散、损耗以及增强其稳定性选用新的方法改变可调谐滤波器的中心波长,获得更快的调制速率等使其更加广泛地应用在光纤光栅传感、OCT 以及光纤通信系统中。

参考文献:

- [1] TAKARA H, KAWANISHI S, SARUWATARI M. 20GHz transform-limited optical pulse generation and bit-error-free operation using a tunable actively mode locked Er-doped fiber ring laser [J]. Electron.Lett., 1993, 29(10):1149-1150.
- [2] DORRING J, YAN L, CHEN Y J, et al. Injection locking of an additive-pulse mode-locked fiber laser [J]. IEEE Photon.Techn.Lett., 2002, 14(11):1497-1499.
- [3] DULING III I N. All fiber ring solution laser mode locked with a non-linear mirror[J].Opt.Let.,1991,16(4):539-541.
- [4] COLLINGS B C, BERGMAN K, CUDIFF S T, et al. Short cavity erbium/ytterbium fiber laser mode-locked with a saturable Bragg reflector[J]. Selected Topics in IEEE J.Quan.Electron.,1997,3(4)1065-1075.
- [5] WOJTKOWSKI H R, FUJIMOTO M. Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography[J]. Optics Express, 2006, 14(8):3225-3237.
- [6] 陈达如. 先进光纤激光器技术及其在光传感 - 光学微波产生的应用 [D]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2009 : 48-53.
- [7] CHEN D. Fourier domain mode locking pulse fiber laser [J]. Laser Physics, 2008, 20(1):281-284.
- [8] 吴薇, 刘辛, 陈婷. 基于半导体光放大器的可调谐激光器[J]. 应用激光, 2008, 28(1):42-44.
- [9] HUBER R, ADLER R, FUJIMOTO J G, et al. Buffered Fourier domain mode locking: unidirectional swept laser sources for optical coherence tomography imaging at 370,000 lines/s [J]. Optics Letters, 2010, 31(20): 2975-2977.
- [10] JEON M Y, ZHANG Jun, WANG Qiang, et al. High-Speed and Wide Bandwidth Fourier Domain Mode-locked Wavelength Swept Laser with Multiple SOAs[J]. Optics Express, 2007, 16(4):2547-2554.
- [11] EIGENWILLIG C M, BIEDERMAN B R, PALTE G, et al. K-space linear Fourier domain mode locked laser and applications for optical coherence tomography[J]. Optics Express, 2008, 16(12):8916-8937.
- [12] LEE Hyung-Seok, JUNG Eun-Joo, JEONG Myung-Yung, et al. Broadband Wavelength-swept Raman Laser for Fourier-domain Mode Locked Swept-source OCT 2009[J]. Journal of the Optical Society of Korea. 2009, 13(3):316-320.
- [13] CHENG K H Y, STANDISH K H Y, YANG B A, et al. Wavelength-swept spectral and pulse shaping utilizing hybrid Fourier domain mode locking by fiber optical parametric and erbium-doped fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2010, 18(3): 1909-1915.
- [14] EIGENWILLIG C M, WIESER W, BIEDERMANN B R, et al. Subharmonic Fourier domain mode locking[J]. opt.lett., 2009, 34(6):725-727.