

文章编号: 1001-3806(2009)02-0162-04

## 光纤激光器锁模技术研究进展

赵羽<sup>1</sup>, 刘永智<sup>1\*</sup>, 赵德双<sup>2</sup>, 黄琳<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054; 2. 电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054)

**摘要:** 锁模光纤激光器能够产生超短脉冲, 在众多领域中有着广泛的应用前景。概述了光纤激光器锁模实现技术的基本原理、典型结构和最新研究进展, 分析了主动锁模、被动锁模和混合锁模技术的优缺点, 并对多波长锁模、拉伸脉冲锁模和基于光子晶体的锁模光纤激光器的最新研究情况进行了介绍和分析。展望了锁模光纤激光器研究的发展方向 and 急需解决的问题。

**关键词:** 激光器; 光纤激光器; 主动锁模; 被动锁模; 混合锁模

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Evolution of mode-locked technology of fiber lasers

ZHAO Yu<sup>1</sup>, LIU Yong-zhi<sup>1</sup>, ZHAO De-shuang<sup>2</sup>, HUANG Lin<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China, 2. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Because ultra short optical pulses can be obtained from a mode-locked fiber laser, it can be applied in many fields. The principle, structure and new evolution of mode-locked fiber lasers were summarized in this paper. The advantage, disadvantages of active, passive and mixed mode-locked technology were analyzed. The new evolution of multi-wavelength mode-lock, stretched pulse mode-lock and photonic crystal based mode-locked techniques were introduced. Finally the latest evolution of mode-locked fiber lasers was discussed and the key issues were pointed out.

**Key words:** lasers; fiber laser; active mode-lock; passive mode-lock; mixed mode-lock

### 引言

锁模光纤激光器由于能够产生超短脉冲, 在超高速大容量长距离的孤子通信和时分复用光通信系统、光电传感、探测诊断、非线性光学、生物医学、军事等众多领域有着广阔的应用前景<sup>[1-8]</sup>。因此, 锁模光纤激光器的研究不仅有着非常重要的学术意义, 而且有着非常重要的实际应用意义。锁模技术最早出现于20世纪60年代初期, 到20世纪80年代中期, 化学汽相沉积法制成了位于光纤低损耗通信窗口的掺铒光纤后, 光纤激光器开始成为热点研究课题, 20世纪90年代进入了其黄金发展时期。作者概述了锁模光纤激光器的主动、被动和混合锁模实现技术的基本原理、典型结构和最新研究进展, 对光纤激光器锁模实现技术的研

究中急需解决的问题进行了讨论, 并展望了其发展方向。

### 1 主动锁模技术

主动锁模是通过外界信号周期性调制谐振腔参量, 实现腔体纵模之间相位锁定的一种锁模技术。其显著特征是: 在激光器腔体中插入调制器件或者由外部注入光脉冲, 对腔内光波进行主动调制来实现锁模。主动锁模具体又可分为基于调制器的锁模技术、有理数谐波锁模 (rational harmonic mode-lock, RHML) 技术和注入锁模技术。

#### 1.1 基于调制器的锁模技术

基于调制器锁模技术的特点是从腔外加入射频 (radio frequency, RF) 信号到腔内的调制器上, 通过此信号对腔内的震荡光波产生周期性的幅度或者相位调制, 从而产生锁模脉冲。这种锁模技术的典型结构如图1所示, RF信号通过调制器对腔内光波进行调制。调制器大都采用波导型 LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器, 因为相对于其它类型的调制器, LiNbO<sub>3</sub> 调制器尺寸较小, 且能够以相当低的耦合损耗集成在光纤腔中。除了使用 LiNbO<sub>3</sub>, 也有使用半导体调制器的, 它的优势在于对偏

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60736038); 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2007AA01Z269); 国防预研基金资助项目 (9140A02040106DZ0222)

作者简介: 赵羽 (1981-), 男, 博士研究生, 主要从事脉冲光纤激光器及其应用的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: yzliu123@uestc.edu.cn

收稿日期: 2008-01-28; 收到修改稿日期: 2008-06-19

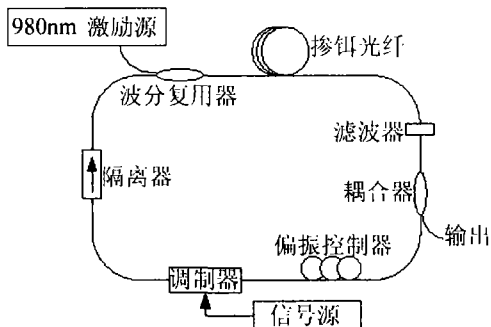


图 1 基于调制器的锁模技术基本结构

振的依赖比  $\text{LiNbO}_3$  小<sup>[1]</sup>。

基于调制器锁模的调制过程为：调制器在正弦电压信号驱动下会产生周期性的幅度或相位变化，这种变化与腔内循环的脉冲相互作用会产生规则的锁模脉冲序列，对应这两种变化方式的调制技术分别称为强度调制和相位调制。由于这种调制器的偏振敏感性，常在它前面用一个偏振控制器来调节入射光场的偏振态，图 1 中的可调谐滤波器用来调节激光的中心波长，光隔离器用来确保激光器单向运转。直接调制的主动锁模技术能够产生与调制频率一致的高重频率锁模脉冲，目前多用于产生 40GHz 的重频<sup>[2]</sup>。

### 1.2 有理数谐波锁模技术

RHML 技术是基于调制器的锁模技术的改进方案，其原理是：当对激光器腔体的主动调制频率为基频的  $n + (k/m)$  ( $n, k, m$  为正整数,  $k < m$  且  $k$  与  $m$  为互质数) 倍数时，只要该谐波分量足够大或腔内增益足够，就有可能出现  $m$  倍频的脉冲输出。这项技术是获得超高重频率脉冲的重要手段。RHML 的基本机构图仍然可以用图 1 表示，区别只是在 RF 的频率调制范围上。2004 年 LIN 等人用的 1GHz 的驱动频率产生了 40GHz 的 RHML 脉冲<sup>[3]</sup>，在稳定性研究方面，2007 年 YANG 等人采用反馈系统获得了脉冲相当稳定的重频为 10GHz 的 5 阶 RHML<sup>[4]</sup>。

### 1.3 注入锁模技术

注入式锁模技术是将光脉冲注入光纤激光器环形腔中，利用光纤的交叉相位调制 (cross-phase modulation, XPM) 效应实现模式的锁定。其基本结构见图 2，

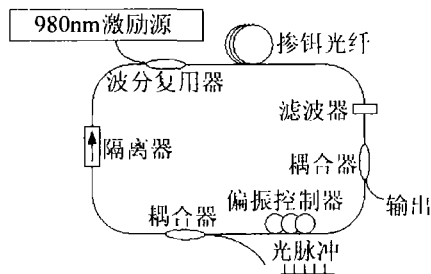


图 2 注入锁模技术基本结构

图中各个器件的作用与图 1 中的类似。这个结构的一

种改进方案是在输入光脉冲的耦合器后面加入一个半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA)，再利用 SOA 的 XPM 效应获得锁模脉冲。其优势在于 SOA 的加入减小了锁模脉冲起振对偏振的依赖性，使得产生的脉冲更稳定<sup>[5]</sup>。注入的光脉冲有采用锁模激光器产生的脉冲，也有采用 FR 信号加到半导体激光器上直接调制所得的光脉冲。WANG 等人在 2003 年在 2.5GHz 的注入脉冲下获得了重复频率为 20GHz 的锁模脉冲<sup>[5]</sup>，LIN 等人在 2006 年基于半导体光放大器获得了 10GHz 重频的脉冲，并用色散补偿光纤和单模光纤将脉宽压缩到 410fs<sup>[6]</sup>。

主动锁模光纤激光器具有脉冲重复速率高、形状对称、中心波长和脉冲重复速率可调谐、易实现高阶谐波锁模、可直接产生无频率啁啾近似变换极限的光脉冲等。但是，由于受到调制带宽的限制，其输出脉冲宽度通常为皮秒量级，并且还容易受到外界环境（如温度变化、机械振动）、谐振腔内偏振态起伏、超模噪声等因素的影响，需要很多复杂的技术来提高系统的稳定性，因此成本相对较高，技术难度大。此外，调制器的引入不仅导致了腔体的附加损耗，而且还引入了一个非光纤元器件，难以实现全光纤集成。

## 2 被动锁模技术

被动锁模是产生皮秒或飞秒脉冲的一种非常行之有效的方法。其基本原理是利用光纤或其它元件中的非线性光学效应对输入脉冲的强度依赖性，实现各纵模相位锁定，进而产生超短光脉冲。

### 2.1 可饱和吸收体锁模技术

早在 20 世纪 70 年代，可饱和吸收效应就已用于被动锁模，在加成锁模技术出现之前，是实现被动锁模的唯一方法。其结构如图 3 所示，其锁模机制可描述

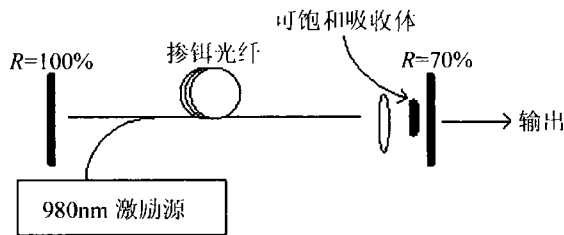


图 3 可饱和吸收体锁模技术基本结构

如下：当光脉冲通过吸收体时，边缘部分损耗大于中央部分，结果光脉冲在通过吸收体的过程中被窄化。光纤激光器中常用的可饱和吸收材料是半导体吸收介质（如 InGaAsP 等）。但是由于可饱和吸收体的引入，这种激光器不是全光纤结构。2006 年 POLYNKIN 等人使用半导体可饱和吸收体作被动锁模，获得平均功率达 755mW 的脉冲序列<sup>[7]</sup>。

## 2.2 非线性偏振旋转 (nonlinear polarization evolution, NPE) 效应锁模技术

利用非线性偏振旋转效应实现被动锁模的光纤激光器结构原理图如图 4 所示。其基本原理是:通过起

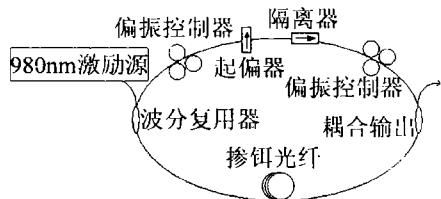


图4 非线性偏振旋转锁模技术基本结构

偏器之后的线偏光经偏振控制器后变成椭圆偏振光,这个椭圆偏振光的两个幅值不同的正交分量经过掺铒光纤得到增益放大,并受到腔内光纤的自相位调制和交叉相位调制的作用产生大小不同的非线性相移,从而使偏振态发生变化。此时调节另一偏振控制器使起偏器能透过脉冲中央的高强度部分而阻挡低强度边缘,这就形成了等效的可饱和吸收体。从实用性角度来看,这种技术具有结构简单,系统稳定性好的特点。2004年 ORTAC 等人使用 NPE 获得了单脉冲能量约 500pJ、脉宽 100fs 的被动锁模脉冲<sup>[8]</sup>,2006年 ZHAO 等人获得了脉宽 200fs、单脉冲能量超过 1nJ 的稳定脉冲<sup>[9]</sup>。

被动锁模技术中还有使用非线性光纤环形镜 (nonlinear optical loop mirror, NOLM),即“8”字型结构的,其基本原理和结构将在下面的混合锁模技术中介绍(见图5)。

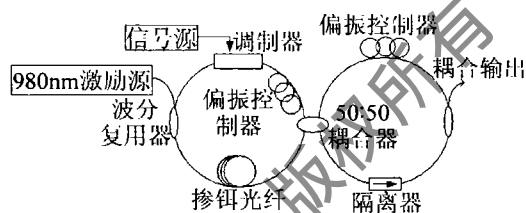


图5 “8”字形混合锁模技术基本结构

## 3 混合锁模技术

混合锁模是指在同一激光器腔体内使用两种以上的锁模技术来实现锁模。其目的是将被动锁模技术产生超短脉冲和主动锁模技术产生高重复频率的特点相结合,以获得窄脉宽、高重复率且稳定的孤子脉冲序列。这种技术的典型结构可以图5中的“8”字形结构表示。其工作原理是:入射光波被 3dB 耦合器分成幅值相等、传输方向相反的两个部分,并受到与强度相关的自相位调制和交叉相位调制等非线性效应的作用而产生非线性相移,当它们再次在耦合器相遇进行相干叠加时,产生了自幅度调制的脉冲窄化效应,“8”字形结构本身是一种被动锁模技术,但一般都用于混合锁

模。当在“8”字的其中一臂上加入主动锁模调制器件,可获得主被动混合锁模。2005年, YANG 等使用调相环形腔镜,在 40GHz 的调制频率下获得了 80GHz, 1.74ps 的脉冲<sup>[10]</sup>;同年, TANG 等人用 SOA 作调制器,获得了重复频率为 4.7GHz 的锁模脉冲,波长调谐范围达 100nm<sup>[11]</sup>。

## 4 锁模光纤激光器的新进展

### 4.1 多波长锁模光纤激光器

连续调谐多波长锁模激光器一直是激光技术很活跃的研究领域。2006年 YOON 等人通过调节偏振环形腔中的梳状滤波器来调节波长,获得了相互间隔为 0.8nm 的 18 个波峰输出<sup>[12]</sup>。CHEN 等人于 2007 年使用色散位移光纤和 Mach-Zehnder 干涉镜,获得了间隔分别为 0.2nm (25GHz), 0.4nm (50GHz), 0.8nm (100GHz) 和 1.6nm (200GHz) 的多波长输出<sup>[13]</sup>。YOSHIDA 等于 2007 年在环形腔中加入一个光频谱干涉仪,调频 1GHz 仍然能够保持模式锁定,并通过滤波器获得 1535nm ~ 1560nm 的波长调谐<sup>[14]</sup>。

### 4.2 拉伸脉冲锁模光纤激光器

由于光纤介质具有较高的色散和非线性系数,限制了锁模脉冲激光器输出能量,对于飞秒脉冲来说,其典型的单脉冲能量一般都在皮焦量级。因此,提高锁模光纤激光器的脉冲能量就显得十分重要。2003年, IDLAY 等人<sup>[15]</sup>通过优化反常色散光纤在腔体中的位置和长度,将掺 Yb<sup>3+</sup> 锁模光纤激光器的输出脉冲能量提升到 5nJ。2005年 LI 等人报道了使用正色散单模大芯径光纤获得了 0.6nJ, 100fs 的高能量脉冲<sup>[16]</sup>。

### 4.3 基于光子晶体、双包层光纤的锁模光纤激光器

在最近几年里,由于光子晶体和双包层抽运技术的成熟,应用光子晶体和双包层光纤来设计锁模光纤激光器也有不少报道<sup>[17-20]</sup>。2004年法国的 ALBERT 等人<sup>[17]</sup>报道了用掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤做为增益介质,基于光栅对展宽压缩脉冲的原理,在 1050nm 处获得能量 11.8nJ、重复频率 9.3MHz、脉宽 196fs、时宽乘积 0.55 的输出脉冲。2006年韩国首尔大学的 SEUNGIN 等人报道了采用长周期光纤光栅进行包层抽运耦合吸收抽运抽运光的实验<sup>[18]</sup>,输出功率在同样的 20W 抽运源抽运情况下最大可增加 55%。可见,光子晶体和双包层抽运技术的成熟再一次为锁模光纤激光器提供了广阔的发展空间。

## 5 展望和急需解决的问题

随着波分复用和光时分复用技术的飞速发展,锁模光纤激光器以其优越的性能将在未来高速光通信系

统中发挥重要作用。根据锁模光纤激光器的研究现状来看,要使锁模光纤激光器能够尽快地走向实用化道路,则需解决好以下几个问题:(1)频谱边带或超模噪声的抑制,激光器脉冲中普遍存在频谱边带和超模噪声,这会加剧通信系统误码率<sup>[21]</sup>。因此,进一步研究频谱边带的产生机理及其抑制措施,减小锁模脉冲输出频谱边带幅度,不论是锁模光纤激光器作为通信系统光源,还是将其应用于其它非线性以及超快领域,都将具有非常重要的实际应用意义。(2)高能量脉冲输出,光纤激光器典型的单脉冲输出能量为几皮焦耳到数十皮焦耳<sup>[15-16]</sup>,远远小于常规固体激光的输出脉冲能量(一般为纳焦耳量级)。因此,要想扩大锁模光纤激光器的应用范围,则必须提高其输出功率和脉冲能量。(3)工作的稳定性,目前在锁模激光器特别是主动锁模技术的稳定性研究中采用的方法往往结构复杂,成本高,难以直接推广应用。因此,需要继续探索和寻求新的技术方法和措施来提高锁模光纤激光器的稳定性。

#### 参 考 文 献

- [1] LAM H Q, SHUM P, BINH L N, *et al.* Polarization-dependent locking in SOA harmonic mode-locked fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(22): 2404-2406.
- [2] PFEIFFER T, VEIH C. 40GHz pulse generation using a widely tunable all-polarisation preserving erbium fibre ring laser [J]. *Electron Lett*, 1993, 29(21): 1849-1850.
- [3] LIN G R, CHANG Y Ch, WU J R. Rational harmonic mode-locking of erbium-doped fiber laser at 40GHz using a loss-modulated Fabry-Pérot laser diode [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(8): 1810-1812.
- [4] YANG Sh Q, CAMERON J, BAO X Y. Stabilized phase-modulated rational harmonic mode-locking soliton fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(6): 393-395.
- [5] WANG T, LOU C Y, HUO L, *et al.* All optical clock division and multiplication by injection mode-locked laser based on SOA [J]. *Opt & Laser Technol*, 2003, 35(6): 463-469.
- [6] LIN G R, CHIU I H. 110pJ and 410fs pulse at 10GHz generated by single-stage external fiber compression of optically injection-mode-locked semiconductor optical amplifier fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(9): 1010-1012.
- [7] POLYNKIN A, POLYNKIN P, PANASENKO D, *et al.* Short-cavity, passively mode-locked fibre laser oscillator at 1.5 $\mu$ m with 550MHz repetition rate and high average power [J]. *Electron Lett*, 2006, 42(3): 41-42.
- [8] ORTAC B, HIDEUR A, CHARTIER T, *et al.* Generation of bound states of three ultrashort pulses with a passively mode-locked high-power Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(5): 1274-1276.
- [9] ZHAO D Sh, LIU Y Zh, WANG B Zh, *et al.* High-energy femto-second Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* 2005, 16(8): 922-925 (in Chinese).
- [10] YANG Sh Q, BAO X Y. Repetition-rate-multiplication in actively mode-locking fiber laser by using phase modulated fiber loop mirror [J]. *IEEE J Q E*, 2005, 41(10): 1285-1292.
- [11] TANG W W, SHU C. 100nm tuning range, picosecond pulse generation employing a PM fiber loop filter in a mode-locked SOA ring laser [C]//Optical Fiber Communication Conference. New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005: 3.
- [12] YOON I, LEE Y W, JUNG J H, *et al.* Tunable multiwavelength fiber laser employing a comb filter based on a polarization-diversity loop configuration [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(4): 1805-1811.
- [13] CHEN D, QIN S, GAO Y, *et al.* Wavelength-spacing continuously tunable multiwavelength erbium-doped fibre laser based on DSF and MZI [J]. *Electron Lett*, 2007, 43(9): 524-525.
- [14] YOSHIDA M, KASAI K, NAKAZAWA M, *et al.* Mode-hop-free, optical frequency tunable 40GHz mode-locked fiber laser [J]. *IEEE J Q E*, 2007, 43(8): 704-708.
- [15] ILDA Y F O, BUCKLEY J R, LIM H, *et al.* Generation of 50fs, 5nJ pulses at 1.03 $\mu$ m from a wave-breaking-free fiber laser [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(15): 1365-1367.
- [16] LI Sh Q, KU K K, DMITRI V. Stretched-pulse mode-locked all-fiber erbium ring laser with low-nonlinear negative-dispersion singlemode fiber [J]. *Proc SPIE*, 2005, 5709: 18-22.
- [17] ALBERT A, COUDERC V. High-energy femtosecond pulses from an ytterbium-doped fiber laser with a new cavity design [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(2): 416-418.
- [18] Baek S G, ROH S Y, JEONG Y C, YOONCHANT, *et al.* Experimental demonstration of enhancing pump absorption rate in cladding-pumped ytterbium-doped fiber lasers using pump-coupling long-period fiber gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(5): 700-702.
- [19] ZHAN Sh B, ZHAO Sh H, DONG Sh F. The experimental study of the Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped double clad fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 606-608 (in Chinese).
- [20] PAN Y Zh, ZHANG J, HU G J. Photonic crystal fiber and laser [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 48-52 (in Chinese).
- [21] LI Y, LOU C, WU J, *et al.* Novel method to simultaneously compress pulse and suppress supermode noise in actively mode-locked fiber ring laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(9): 1250-1252.