

文章编号: 0258-7025(2004)10-1157-04

同步抽运锁模的掺镱光纤激光器

冯新焕, 付圣贵, 范万德, 袁树忠, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要 同步抽运锁模是一种调制增益的锁模技术, 就是调节抽运光的调制频率使之等于激光器纵模间隔的整数倍。通过对抽运光源半导体激光器的驱动电流进行正弦调制, 实现了掺镱光纤激光器(YDFL)的同步抽运锁模。通过调整抽运激光器的调制频率, 在相应于二次谐波锁模, 4阶有理数谐波锁模条件下分别得到了较窄的脉冲输出。对重复频率 625 kHz 的二次谐波锁模脉冲序列, 脉冲宽度小于 20 ns, 约为抽运光宽度的 1/40; 平均输出功率 2.34 mW, 能量转换效率约为 5%。

关键词 激光技术; 掺镱光纤激光器; 同步抽运锁模; 有理数谐波锁模

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Yb³⁺-Doped Fiber Laser Based on Synchronously Pumped Mode-Locking

FENG Xin-huan, FU Sheng-gui, FAN Wan-de, YUAN Shu-zhong, DONG Xiao-yi

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract Synchronously pumped mode-locking can be obtained when the frequency for gain switching of the pump-laser is equal to (or an integer multiple of) the cavity mode spacing, corresponding to the harmonic mode-locked status. A synchronously pumped mode-locked ytterbium-doped fiber laser (YDFL) is obtained when the pump semiconductor laser current is modulated sinusoidally at the appropriate frequency. By modulating frequency of the pump laser narrower output pulses are obtained on the second harmonic and rational harmonic mode-locked status and the 4th-order rational harmonic mode-locking status. At the repetition rate of 625 kHz, the pulse width of second harmonic mode-locked pulse train is less than 20 ns, approximately 1/40 of the pump-pulse-width. The average output power is about 2.34 mW and the energy convert efficiency is about 5%.

Key words laser technique; Yb³⁺-doped fiber laser; synchronously pumped mode-locking; rational harmonic mode-locking

1 引言

稳定、低噪声的超短脉冲光纤激光器在许多方面有着重要的应用。一般来说, 获取短的激光脉冲的常用方法是调 Q 技术和锁模技术。被广泛研究的锁模光纤激光器因其锁模机制不同主要可分为主动锁模、被动锁模及混合锁模三类。主动锁模最常用的方法是振幅调制(AM)或频率调制(FM)。已采用的调制器有电光调制器^[1]、法-珀(F-P)腔半导

体激光器^[2]、半导体光放大器^[3]、应用交叉相位调制(XPM)非线性效应调制激光相位^[4]等。

由于掺镱光纤有着很宽增益谱和极高的光抽运效率, 且掺镱光纤激光器(YDFL)可作为掺 Tm³⁺ 光纤放大器及拉曼激光器的抽运源, 从而使其受到越来越多的重视^[5~9]。现已实现了调 Q^[5~7], 自锁模^[8], 被动锁模^[9]的掺镱光纤激光器。这些激光器或非全光纤结构, 或产生的脉冲不稳定。我们将同步抽运锁模技术用于掺镱光纤激光器, 得到了稳定

收稿日期: 2003-08-04; 收到修改稿日期: 2003-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(60137010)和天津市科委重点基金(013800411)资助项目。

作者简介: 冯新焕(1974—), 女, 河北辛集人, 南开大学现代光学研究所在读博士研究生, 主要从事光纤激光器及放大器的研究工作。E-mail: xh_feng@eyou.com

的锁模脉冲。这种技术最初应用于染料激光器来产生短的激光脉冲^[10],也有用于钛宝石激光器的^[11]。因为仅仅以适当的频率调制抽运光源的驱动电流就可实现锁模,这种技术在半导体激光器抽运的掺镱光纤激光器上应用起来相当简单,同时还避免了使用腔内各种昂贵的调制器,节省了资源,减小了附加损耗,是一种全光纤的锁模掺镱光纤激光器。它和其他形式的锁模激光器一样,在许多方面具有广泛的应用,另外,同步抽运锁模所特有的同步性决定了它在同步探测和非线性光学等方面的独特用途,例如可用来表征高速半导体器件的特性等。

2 原理及实验装置

锁模既可以通过周期性地调制谐振腔的损耗,也可以通过周期性地调制谐振腔的增益来实现,同步抽运锁模是一种调制增益的锁模技术,即调节抽运光的重复频率使之等于激光器纵模间隔的整数倍。在一定条件下,增益就在时间上得到调制,与内部损耗调制时的情况相似,此时在最大增益时域内形成一短脉冲,由此实现同步抽运锁模。仔细调整加在激光二极管(LD)上的交流电流的频率 f_{RF} ,当调制频率为腔基频 f_{cav} 的整数倍时,即 $f_{RF} = mf_{cav}$,腔内将有 m 个脉冲在往返循环,同时得到抽运光的加强,在输出端得到重复频率为 f_{RF} 的谐波锁模脉冲。当调制频率失谐 f_{cav}/n 时,脉冲在腔内循环 n 周后,腔内将有 $(nm + 1)$ 个脉冲受到相同的抽运光加强,产生 n 倍于调制频率的输出脉冲序列,对应于有理数谐波锁模状态。通过调整腔内用于匹配腔长的单模光纤的长度,即调整了激光器纵模间隔,应用同步抽运锁模技术,则理论上可得到任意重复频率的锁模脉冲。

实验装置如图1,谐振腔由976 nm/1060 nm波分复用器(WDM)、长15 m的掺镱光纤(YDF)、长约300 m的单模光纤(SMF)、一光纤光栅(FBG)和一全反射光纤环境构成。与产生连续光的线性腔激光器的不同在于抽运激光器的驱动电流是正弦调制的,调制信号由一TD1632型数字信号发生器提供,输出正弦信号的频率、幅度连续可调。单模光纤用于匹配激光器腔长,改变单模光纤的长度,则对应的腔基频改变,当抽运光驱动电流的调制频率与之严格匹配时,则可得到相应频率的锁模脉冲。抽运光通过波分复用器进入掺镱光纤进行抽运。光栅用于选频和输出,光栅的中心波长为1054.9 nm,反射率

为97.5%,3 dB带宽为0.2 nm。输出光脉冲的频谱特性由ADVANTEST Q8383光谱仪检测,时间特性由PIN管转换后输入100 MHz带宽的Tektronix2232型数字示波器进行测试。

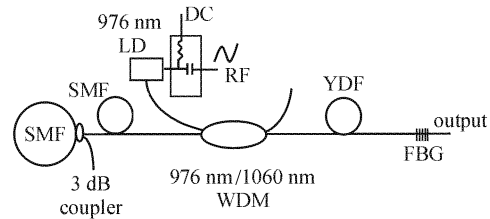


图1 同步抽运锁模的掺镱光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the synchronously pumped mode-locked YDFL

3 实验结果及讨论

实验中测得的环形腔基频为311.5 kHz,对应的腔长约为322 m。仔细调整加在LD上的调制信号频率,在 f_{RF} 偏离 f_{cav} 较多时,输出激光为连续光,随着偏离量的减小,示波器上显示正弦调制光,个数和形状等同于抽运脉冲序列,偏离量继续减小,脉冲幅度增加,形状发生改变。当 f_{RF} 为311.5 kHz时,即等于腔基频时,得到了单波长稳定的锁模脉冲序列,如图2所示。图2(a)为光谱图,中心波长对应于光栅的反射中心波长1054.9 nm,光谱半宽度约为0.16 nm,边模抑制比(SMSR)大于35 dB。图2(b)为对应的脉冲序列,重复频率为311.5 kHz,脉冲宽度由示波器判读约为40 ns,如图2(c)。与此抽运光1.6 μ s的宽度相比,明显变窄,所对应的平均输出功率1.86 mW。调制信号频率为625 kHz时,即等于2倍的腔基频时,得到的锁模脉冲序列如图3所示。由图3(a)可看出二次谐波锁模脉冲序列的重复频率与抽运光相同,脉冲半宽度约为20 ns,如图3(b)所示,对应的平均输出功率2.34 mW。当调制信号频率约为389 kHz时,即等于5/4倍的腔基频时,得到的锁模脉冲序列如图4所示,对应4阶有理数谐波锁模,脉冲序列的重复频率1.557 MHz,为调制信号频率的4倍,平均输出功率1.97 mW。由于频率调节不太精确,所得的脉冲序列不太稳定,未测得单个脉冲宽度,但通过与图3(a)比较可看出,此时脉冲宽度要比二次谐波锁模脉冲窄许多。

由实验结果可看出,随着脉冲重复频率的增加,锁模脉冲的宽度减小,这和已有的主动锁模理论是

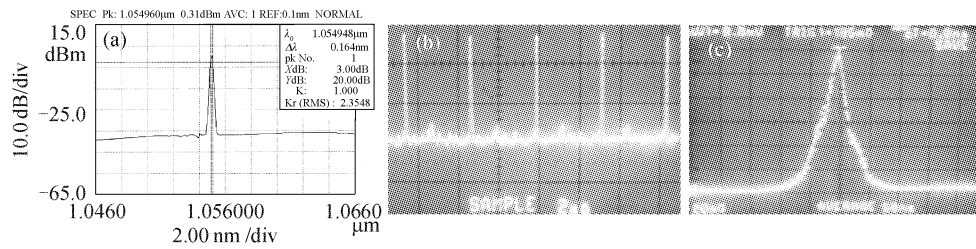


图2 抽运源调制频率等于纵模间隔时的激光输出

(a) 激光光谱图;(b) 锁模脉冲序列;(c) 单个锁模脉冲

Fig. 2 Output when the modulation frequency is equal to the cavity mode spacing

(a) spectrum of the laser; (b) mode-locked pulse train; (c) single mode-locked pulse

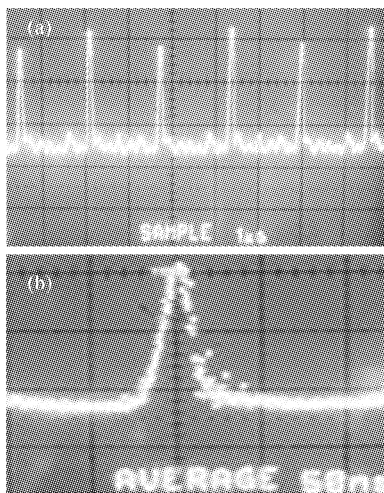


图3 二次谐波锁模脉冲

(a) 脉冲序列;(b) 单个锁模脉冲

Fig. 3 Second harmonic mode-locked pulse

(a) pulse train; (b) single pulse

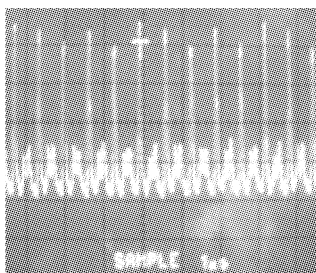


图4 4阶有理数谐波锁模脉冲序列

Fig. 4 4th-order rational harmonic mode-locked pulse train

调制频率足够高时,利用 LD 的增益开关效应可产生高重复频率的抽运光脉冲,则此光纤激光器可提供更高重复频率、脉宽更窄的锁模脉冲输出。另外,腔内的光栅起到了窄带滤波器的作用,在滤波器带宽较小时,锁模脉冲的宽度会随光滤波器带宽的减小而变宽^[12],而现有光栅的 3 dB 带宽仅有 0.2 nm (一般用于主动锁模激光器中的滤波器带宽为 2 nm 以上),如采用宽带滤波器,则光脉冲可望进一步压窄。

由实验结果还可看出,二次谐波锁模以及 4 阶有理数谐波锁模时,脉冲的幅度有一定的不均衡性,这主要是受现有信号发生器调节精度的限制,未将调制频率调到最佳匹配状态;而且实验过程中信号频率自身会有一些漂移。但与利用腔内调制器主动锁模激光器的有理数谐波锁模脉冲相比,幅度均衡性还是很好的。

4 结 论

通过对抽运光源半导体激光器的驱动电流进行正弦调制,得到了同步抽运锁模的掺镱光纤激光器。在相应于谐波锁模、有理数谐波锁模条件下得到了较窄的脉冲输出。对重复频率 625 kHz 的二次谐波锁模脉冲序列,脉冲宽度小于 20 ns。如采用更高重复频率的驱动电流以及宽带滤波器,则锁模脉冲的指标可望进一步提高。和其他形式的脉冲掺镱光纤激光器相比,具有结构简单、重复频率可调、应用广泛等优点。

参 考 文 献

- 1 Yongkui Ding, Yongqiang Wang, Zhiyong Li *et al.*. Hybrid-type passively and actively modelocked fiber laser with a DI-NOLM [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, 1(5):286~288
- 2 Donghui Zhao, Ka Lun Li, Kam Tai Chan *et al.*. Generation of 10GHz transform-limited pulse train from fibre ring laser using

相符的。实验中记录下来脉宽最窄的是二次谐波锁模时,脉冲宽度大约 20 ns。由于受 PIN 管和示波器响应时间的限制,脉冲实际宽度应该更窄。在本实验中,由于受到半导体驱动电路中电子器件响应速度的限制,使电流的调制频率最高不超过 660 kHz,此时所得抽运光基本上是正弦调制的。如果

- Fabry-Perot semiconductor as modulator [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(20):1700~1701
- 3 D. M. Patrick. Modelocked ring laser using nonlinearity in a semiconductor laser amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(1):43~44
 - 4 A. D. Ellis, K. Smith, D. M. Patrick. All optical clock recovery at bit rates up to 40 Gbit/s [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(15):1323~1324
 - 5 J. A. Alvarez-Chavez, H. L. Offerhaus, J. Nilsson *et al.*. High-energy, high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):37~39
 - 6 S. V. Chernikov, Y. Zhu, J. R. Taylor *et al.*. Supercontinuum self-Q-switched ytterbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(5):298~300
 - 7 C. C. Renaud, R. J. Selvas-Aguilar, J. Nilsson *et al.*. Compact high-energy Q-switched cladding-pumped fiber laser with a tuning range over 40 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8):976~978
 - 8 Liang Jianzhong, Hu Yimei, Sun Diechi *et al.*. Study on the self mode-locking Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):865~867
 - 梁建忠, 胡谊梅, 孙迭麓 等. 自锁模掺镱光纤激光器研究 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):865~867
 - 9 Herve Leblond, Mohamed Salhi, Ammar Hideur *et al.*. Experimental and theoretical study of the passively mode-locked ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **65**(6):063811-1~063811-5
 - 10 Bao Xiaoyi, Wu Cunkai. Theory of synchronously pumped mode-locking dye lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, **8**(7):577~583
 - 鲍晓毅, 吴存恺. 同步泵浦锁模染料激光器的理论 [J]. *光学学报*, 1988, **8**(7):577~583
 - 11 Ning Jiping, Yao Jianquan, Sheng Weidong *et al.*. Titanium doped sapphire laser pumped by pulsed laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, **A20**(9):703~705
 - 宁继平, 姚建铨, 生卫东 等. 脉冲激光泵浦的钛宝石激光器 [J]. *中国激光*, 1993, **A20**(9):703~705
 - 12 O. Deparis, R. Kiyari, O. Pottiez *et al.*. Bandpass filters based on π -shifted long-period fiber gratings for actively mode-locked erbium fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(16):1239~1241



征 订 启 事

《光学手册》

顾问: 龚祖同 主编: 李景镇 陕西科学技术出版社 16开 1541页 定价: 100.00元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式, 1400 余幅插图和 400 多个数据表格, 230 万字。手册包括 25 个光学分科(辐射度学和光度学, 色度学, 光谱学, 光源, 成像光学, 信息光学, 量子光学, 统计光学, 分子光学, 非线性光学, 光的偏振, 光学薄膜和滤光片, 纤维光学和变折射光学, 集成光学, 视觉光学, 大气光学, 海洋光学, 高速摄影和光子学, 显微物镜和目镜, 光学调制器, 热探测器和光电探测器, 感光材料, 光学计量仪器, 光学材料, 光学工艺学), 5 个附录, 2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成, 在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助, 保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富, 表达方式详略得当, 是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行, 会议论文集由《中国激光》编辑部出版。本论文集共收录论文 173 篇, 600 多页。定价为每册 100 元, 光盘版为每张 50 元。

论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果, 显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行, 会议论文集由《光学学报》编辑部出版。本论文集共收录论文 436 篇, 800 多页, 分上下两册。定价为每套 100 元, 光盘版为每张 50 元。

对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是: 质量之高, 可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话: 021-69918428, 021-69918011, 请从邮局汇款

地址: 上海 800-211 信箱, 光学期刊联合编辑部 邮编: 201800