

基于 Sagnac 干涉仪的混合锁模光纤激光器*

何 理 杨伯君 于 丽 张晓光

(光通信与光波技术教育部重点实验室,北京邮电大学理学院,北京 100876)

摘 要 研制了一台波长可调混合锁模掺铒光纤激光器. 该激光器是由基于分光比为 30 : 70 的耦合器和偏振控制器组成的 Sagnac 干涉仪构成. 通过 10 GHz 的调制器的调制, 得到重复率为 9.998149 GHz, 脉宽小于 18 ps 的锁模脉冲输出. 该脉冲是近变换极限脉冲.

关键词 锁模; 调制; 掺铒光纤; 环形腔

中图分类号 TN253

文献标识码 A

文章编号 1004-4213(2007)01-0005-4

0 引言

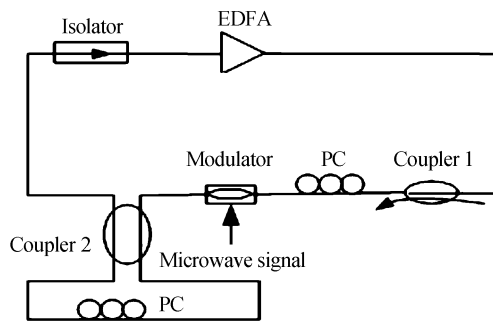
对高比特速率光通信系统来说,超短光脉冲源的研究至关重要,引起人们极大兴趣^[1-7]. 特别是主动锁模光纤激光器因能产生超高速率、近变换极限光脉冲成为其中一种理想光源,受到人们的广泛关注. 主动锁模光纤激光器输出的脉冲重复率高,啁啾小,但是输出脉宽比较宽,稳定性受外界因素的影响也很明显. 如果在谐振腔内插入一些合适的非线性器件,如 Sagnac 干涉仪、非线性偏振旋转器件等,就可以进一步压窄脉冲,稳定性也有所提高. 同时,调制器可以工作在往返频率的高倍频率处,结果重复率能超过 10 GHz,而纵模间隔保持在 10 MHz.

本文采用在主动锁模光纤激光器中插入 Sagnac 干涉仪,构成了混合锁模光纤激光器. 在重复率为 9.998149 GHz 时,获得了脉宽小于 18 ps 的脉冲输出,工作波长为 1561.060 nm,相应的频谱宽度为 0.282 nm.

1 实验装置

基于 Sagnac 干涉仪的混合锁模光纤激光器的实验装置如图 1. 实验中掺铒光纤放大器是由法国 Keopsys 公司生产的高功率放大器. 其性能如下: 饱和输出功率为 30 dBm,小信号增益大于 45 dB,放大器噪音小于 6 dB,光带宽为 1531 nm~1565 nm. 隔离器保证光在环形腔中单向传输并吸收来自 Sagnac 干涉仪的后向反射光. 耦合器 1 和耦合器 2 由光子科技有限公司提供. 耦合器 1 分束比为 10 : 90,其中,10%用于信号输出. 耦合器 2 分束比为 30 : 70. 调制器为 Corning 生产的 LiNbO₃ Mach-Zehnder 调

制器,3 dB 带宽,插入损耗和半波电压分别为 4 GHz, 3.5 dB 和 6.8 V. 它被 10 GHz 的微波信号所驱动. 该微波信号由安立公司生产的脉冲信号发生器提供,输出频率范围是 5 MHz 到 12.5 GHz,频率连续可调. 锁模后的输出光经过滤波器后分别送入 Advantest Q8348 光谱仪(最小分辨率为 0.01 nm)和 HP 83480A 型取样示波器(能测量的最大频率为 40 GHz)进行测量.



PC: Polarization controller EDFA: Erbium-doped fiber amplifier

图 1 基于 Sagnac 干涉仪的混合锁模光纤激光器实验装置
Fig. 1 Experimental configuration of hybrid mode-locking fiber laser incorporating a Sagnac interferometer

2 Sagnac 干涉仪的传输特性

Sagnac 干涉仪的结构如图 2. 用一段光纤将光纤耦合器的两个输出端口连接起来形成一个环,就

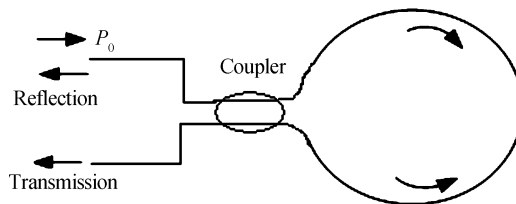


图 2 Sagnac 干涉仪的示意图
Fig. 2 Schematic of Sagnac interferometer

可以构成一个 Sagnac 干涉环. 设光纤耦合器的分束比为 α , 入射的连续光功率为 P_0 , 进入耦合器后沿前向和后向传输光场的振幅为

*国家自然科学基金(60378011)和北京市教委共建项目(XK100130537)资助
Tel: 010-62281490 Email: xiaohetime@163.com
收稿日期: 2005-12-01

$$A_t = \sqrt{\alpha}A_0 \quad A_b = i\sqrt{1-\alpha}A_0 \quad (1)$$

经过一次往返后,两个光场不但获得了线性相移,而且还获得了自相位调制和交叉相位调制引入的非线性相移,结果两光场到达耦合器后变为

$$A'_t = A_t \exp [i\phi_0 + i\gamma(|A_t|^2 + 2|A_b|^2)L] \quad (2)$$

$$A'_b = A_b \exp [i\phi_0 + i\gamma(|A_b|^2 + 2|A_t|^2)L] \quad (3)$$

式中, $\phi_0 = \beta L$ 是线性相移, L 是 Sagnac 干涉仪的长度, β 是环内传输常量。

利用光纤耦合器的传输矩阵可以得到反射和透射光场为

$$\begin{pmatrix} A_t \\ A_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\alpha} & i\sqrt{1-\alpha} \\ i\sqrt{1-\alpha} & \sqrt{\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A'_t \\ A'_b \end{pmatrix} \quad (4)$$

忽略色散时,利用式(1)~(4)可得透射光场为

$$|A_t|^2 = |A_0|^2 (1 - 2\alpha(1-\alpha) \{1 + \cos[(1-2\alpha)P_0 2\pi n_2 L/\lambda]\})$$

这里, α 是耦合器的分光比, n_2 为非线性系数, λ 为入射光脉冲的波长. 因此, Sagnac 干涉仪的入射功率 P_0 与透射率 T 的关系为

$$T = 1 - 2\alpha(1-\alpha) \{1 + \cos[(1-2\alpha)P_0 2\pi n_2 L/\lambda]\}$$

从式可以看出,当耦合器分光比为 0.5 时,就成为光纤环境. 当分光比不等于 0.5 时, Sagnac 在不同的输入功率下表现的开关特性. 透射光功率与入射光功率随 α 的变化如图 3. 图 3 表明, Sagnac 干涉仪对输入光波具有非线性调制特性^[8]. 在第一个透射峰之前,透射光功率随入射光功率的增加非线性增加,由于光脉冲不同部分的强度不同,由图可知光脉冲峰值部分将得到较大程度的透射甚至完全透射,而脉冲前后沿的透射较弱,这样就形成了一种等效的饱和和吸收效应,使输入光脉冲经过透射后得到压缩. 在输入光功率大于第一个透射峰的峰值光强时,自相位调制引起的相移大于 π 时,脉冲峰值部分透射率减小,透射光将被展宽,随着入射脉冲光功率的逐

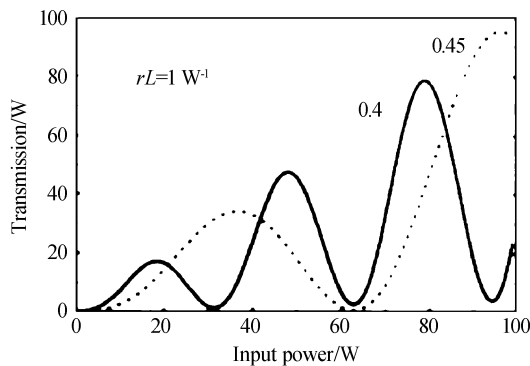


图 3 两个 α 值下透射功率随输入功率的变化
Fig. 3 Transmission power versus input power with two α

渐增加,透射光脉冲将会出现双峰.

3 实验结果及讨论

实验中,逐渐增加掺铒光纤放大器泵浦光的驱动电流,使其输出功率为 16.7 dBm,调节加在调制器上的偏置电压等于 5.7 V,脉冲信号发生器输出微波频率调节到 9.998149 GHz 时,适当调节偏振控制器使光纤激光器处于最佳锁模状态. 用光谱仪和示波器分别测得的锁模光信号的频谱和锁模脉冲波形分别如图 4 和图 5.

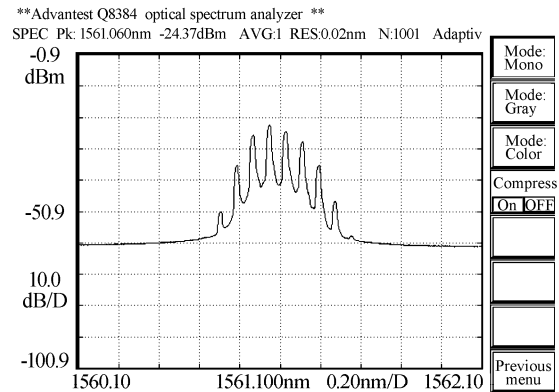


图 4 微波信号调制后的激光光谱
Fig. 4 Lasing spectrum modulated by the microwave signal

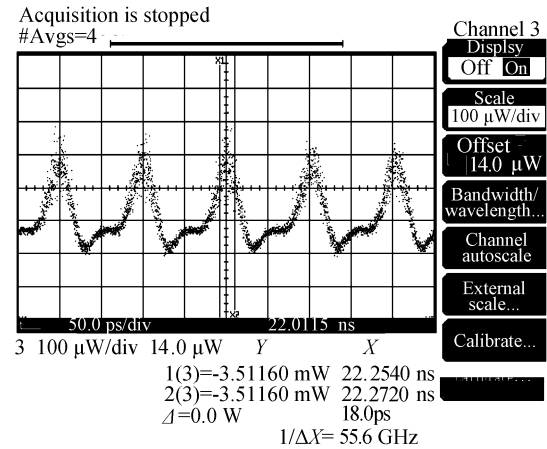


图 5 锁模脉冲输出
Fig. 5 Mode-locking pulse output

可见脉冲重复率和频谱宽度为 9.998149 GHz 和 0.282 nm. 此时输出脉冲宽度由示波器判读为 18 ps,考虑滤波器的响应时间和取样平均,实际脉宽小于 18 ps. 用光功率计对输出脉冲进行测量可知,光信号平均输出功率为 1.587 mW.

作为比较,在图 1 的环路中去掉 Sagnac 干涉仪,构成了一个主动锁模光纤环形腔激光器,此时输出光谱和脉冲如图 6 和图 7,此时输出脉冲宽度由示波器判读为 24.5 ps. 对应的谱宽为 0.211 nm.

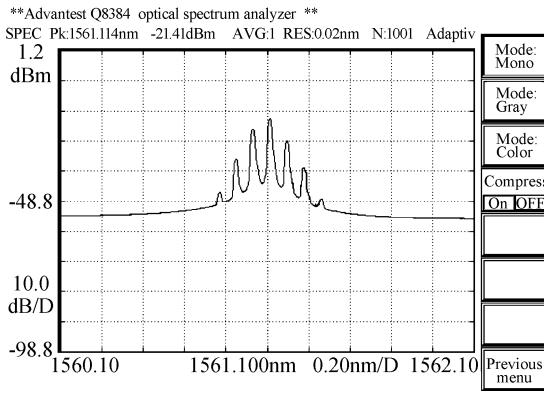


图 6 没有 Sagnac 干涉仪时的光谱
Fig. 6 Lasing spectrum without Sagnac interferometer

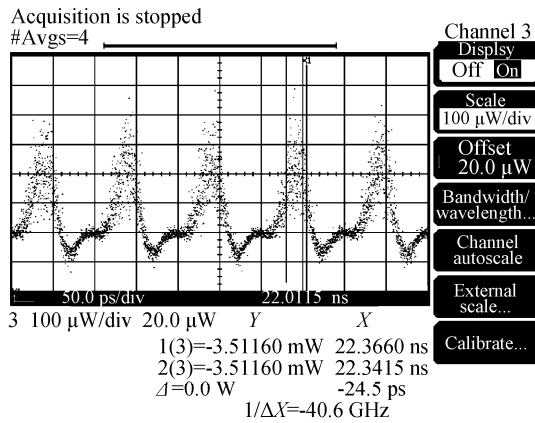


图 7 没有 Sagnac 干涉仪时锁模脉冲输出
Fig. 7 Mode-locking pulses output without Sagnac interferometer

图 8 是实测的 Corning 生产的 LiNbO₃ Mach-Zehnder 调制器的调制曲线. 从图中可以看出调制器件在 0 V、4 V 附近调制曲线最陡. 在实验中,把调制器偏压调节到 5.7 V 时,取得很好的锁模效果.

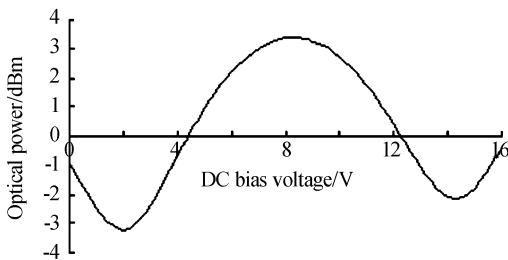


图 8 调制器的调制曲线
Fig. 8 Modulation curve of the modulator

在实验中,调节误码仪的频率调节旋钮,当微波输出频率为 10.754316 GHz 时,也可以观察到稳定的脉冲输出. 同主动锁模光纤激光器相比,通过混合锁模技术可以使调制器工作在往返频率的高倍频率处,结果重复频率能超过 10 GHz,这是混合锁模光纤激光器的优点.

对于长度几十甚至一、二百米的光纤谐振腔来说,光纤的长度及折射率受到环境温度等的漂移而发生变化,造成失谐. 实验中对混合锁模光纤激光

器的失谐现象进行了观察. 在最佳锁模频率 9.998149 GHz 处,通过微调误码仪的输出信号频率,可以观察到输出脉冲幅度减小甚至光脉冲崩溃,当微波信号调制频率在 9.998149 GHz±5×10⁻⁵ GHz 的范围内,激光器输出脉冲波形基本上保持不变.

4 结论

本文研制的混合锁模光纤环形激光器具有以下优点:1)采用混合锁模技术,得到了重复率超过 10 GHz 的脉冲;2)利用 Sagnac 干涉仪的开关特性,环中低能量的色散波和噪音被 Sagnac 干涉仪反射回去,有效消除噪音、改善脉冲质量;3)Sagnac 干涉仪具有反射低强度信号而毫无影响地透射高强度信号的特性,经过无数次震荡后脉冲得到有效压缩. 这样使其性能优于常规的光纤环激光器.

参考文献

- [1] NAKAZAWA M, YOSHIDA E. A 40 GHz 850 fs regeneratively FM mode-locked polarization maintaining erbium fiber ring laser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, **12**(12): 1613 – 1615.
- [2] YAO J, YAO J P, WANG Y, et al. Active mode locking of tunable multi-wavelength fiber ring laser[J]. *Opt Commun*, 2001, **191**(3-6): 341 – 345.
- [3] ABEDIN K S, KUBOTA F. Wavelength tunable high-repetition-rate picosecond and femtosecond pulse sources based on highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, **10**(5): 1203 – 1210.
- [4] LI S P, CHAN K T. A novel configuration for multiwavelength actively mode-locked fiber lasers using cascaded fiber Bragg gratings[J]. *Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(2): 197 – 181.
- [5] LI S P, LOU C Y, CHAN K T. Rational harmonic active and passive modelocking in a figure-of-eight fiber laser [J]. *Electronics Letters*, 1998, **34**(4): 375 – 376.
- [6] YANG Lin-zhen, CHEN Guo-fu, WANG Yi-shan, et al. Experimental of study of ultrashort pulse Yb³⁺-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 333 – 335. 杨玲珍, 陈国夫, 王屹山, 等. 超短脉冲 Yb³⁺ 光纤激光器实验研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(3): 333 – 335.
- [7] LI Ya-nan, YU Jin-long, WANG Jian, et al. A novel scheme for the cavity length stability of actively mode-locked fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **33**(8): 897 – 900. 李亚男, 于晋龙, 王剑, 等. 一种新型主动锁模光纤激光器腔长稳定技术研究[J]. *光子学报*, 2005, **33**(8): 897 – 900.
- [8] AGRAWAL G P, JIA Dong-fang, YU Zhen-hong, et al. Nonlinear fiber optics and applications of nonlinear fiber optics (third edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. G. P. Agrawal, 贾东方, 余震虹, 等. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

Hybrid Mode-Locking Fiber Laser Incorporating a Sagnac Interferometer

HE Li, YANG Bo-jun, YU Li, ZHANG Xiao-guang

(*Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876*)

Received date: 2005-12-01

Abstract A wavelength tunable, hybrid mode-locking fiber ring laser is demonstrated. The laser incorporates a Sagnac interferometer, which is formed by a polarization controller and an additional coupler with the splitting rate of 30 : 70 only. With 10 GHz signal modulation of the modulator, the pulse duration at the repetition rate of 9.998149 GHz was less than 18 ps. The output pulse was nearly transform-limited.

Key words Mode-locked; Modulate; Er^{3+} -doped fiber; Ring cavity



HE Li was born in Anhui Province in 1976. He received his B. S. degree in Physics from Anqing Normal College in 1998. Now he is a Ph. D. candidate in Beijing University of Posts and Telecommunications. His major focus areas include photonic crystal fiber, fiber laser, pulse compression.