

文章编号: 0258-7025(2005)07-0873-05

调 Q 及连续掺 Yb 光纤激光器中的自锁模研究

冯小星^{1,3}, 陈 柏¹, 朱 毅^{1,3}, 陈嘉琳¹, 梁丽萍², 林尊琪¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
²上海理工大学理学院物理系, 上海 200093; ³中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在用半导体激光器抽运的单包层掺 Yb 调 Q 光纤激光器中观察到了清晰稳定的自锁模脉冲序列, 脉冲包络形状为调 Q 脉冲, 每个锁模脉冲的幅值由其在调 Q 脉冲中的相应位置决定。经过分析, 认为自相位调制是调 Q 光纤激光器中产生锁模的主要原因。自相位调制的存在使得光脉冲的频谱被展宽, 当这种展宽和腔的模式间隔相差不多时, 腔内的模式便能相互作用, 直到它们之间产生一个固定的相位关系, 也即形成锁模。在此基础上, 去掉声光晶体, 并用两个光栅作为腔镜, 实现了全光纤法布里-珀罗(F-P)腔锁模光纤激光器。改变腔结构, 分别采用光栅和光纤反射圈作为前后腔镜, 同样观察到了锁模脉冲。经过观察发现, 锁模脉冲的产生和掺 Yb 光纤的浓度、长度、抽运功率的大小有着密切的关系, 这为锁模脉冲的产生提供了一种新的方法。

关键词 激光技术; 导波与光纤光学; 锁模光纤激光器; 调 Q; 自锁模

中图分类号 TN248.1; TN253 **文献标识码** A

Study of Self Mode-Locking in Q-Switched and Continuous Working Yb-Doped Fiber Laser

FENG Xiao-xing^{1,3}, CHEN Bai¹, ZHU Yi^{1,3}, CHEN Jia-lin¹, LIANG Li-ping², LIN Zun-qi¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Department of Physics, Shanghai Science and Technology University, Shanghai 200093, China
³ Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A clear and stable self mode-locked pulse train was observed with Q-switched pulse envelope in diode pumped Yb-doped Q-switched fiber lasers. Self phase modulation (SPM) is regarded as the main reason to generate mode-locked pulses in this Q-switched fiber laser. The main effect of SPM is to broaden the spectrum of the optical pulses. If the width of the broadened spectrum is comparable with the cavity-mode spacing then the modes can interact with each other, and a fixed-phase relationship between different oscillating axial modes is maintained, resulting in the mode-locked operation. On this basis, the acousto-optic modulator (AOM) was removed and two gratings were used as the cavity mirrors, and an all-fiber Fabry-Perot (F-P) cavity fiber laser was realized. Similar mode-locked pulses were observed when using two ring reflectors as the cavity mirrors. It is observed that mode-locking has close relations with fiber length, Yb-doped concentration and pump power. Such kind of lasers provide a new method to generate mode-locked pulses.

Key words laser technique; guided wave and fiber optics; mode-locked fiber laser; Q-switching; self mode-locking

1 引 言

锁模激光器产生的短至几纳秒, 几皮秒甚至几飞秒的超短脉冲可用于光纤通信系统、超快光谱学、多光子微观、自然界超快现象捕捉以及光纤传感器等众多领域^[1], 其中锁模光纤激光器更是由于其出

射光束空间质量好、结构紧凑、成本低等优点而受到广泛的关注^[2~10]。

实现锁模的方法主要有主动锁模和被动锁模。光纤激光器中最常用的主动锁模技术是利用振幅或相位调制器实现, 而被动锁模则是通过在腔内加入可饱和吸收体或利用非线性效应实现。若通过调制

收稿日期: 2004-08-16; 收到修改稿日期: 2004-10-21

作者简介: 冯小星(1981—), 女, 河南郑州人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事光纤激光器和双包层光纤放大器的研究工作。E-mail: fengxiaoxing@mail.siom.ac.cn

器或者块状可饱和吸收体实现锁模,则势必要破坏激光器的全光纤结构。而利用非线性效应产生的锁模则很难精确控制脉冲的重复频率、稳定性和对偏振态的敏感特性。在本文的实验中,不仅在用半导体激光器抽运的单包层掺 Yb 调 Q 光纤激光器中观察到了清晰稳定的自锁模脉冲序列,而且还在改进后的全光纤法布里-珀罗(F-P)腔光纤激光器中观察到了锁模脉冲。改进后的锁模激光器腔内没有插入任何调制元件,并且不需要通过偏振控制器等器件来启动锁模,在简化了腔结构的同时也为锁模脉冲的形成提供了一种新的可能。

2 调 Q 光纤激光器

掺 Yb 调 Q 光纤激光器的实验装置如图 1 所

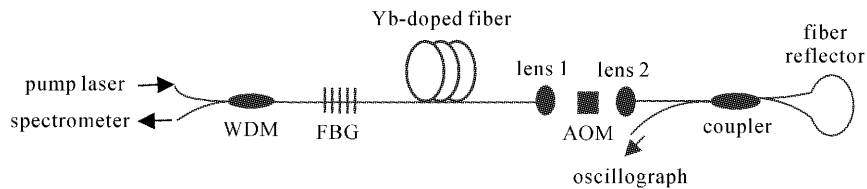


图 1 掺 Yb 调 Q 光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Yb-doped Q-switched fiber laser

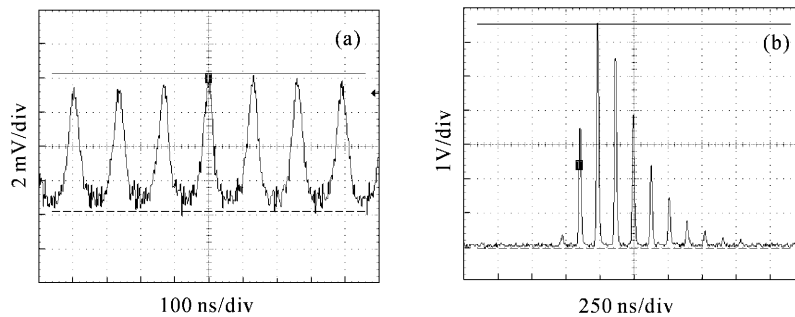


图 2 激光器未调 Q (a) 和调制 Q 工作(b)时锁模脉冲序列

Fig. 2 Mode-locked pulse train without (a) and with (b) Q-switching

3 调 Q 锁模的实验结果

采用连续抽运方式,最大抽运功率 150 mW。选用 6 m 长的掺 Yb 光纤。声光晶体工作在零级调 Q 状态,调节耦合效率为 51%。关闭声光晶体,当抽运功率超过阈值时,观察到了稳定的脉冲序列,脉宽约 20 ns,脉冲间隔约 130 ns。当抽运功率为 150 mW 时,峰值功率约为 12 mW。如图 2(a) 所示。

打开声光调制器,使光纤激光器工作在调 Q 状态,调制脉冲的重复频率为 250 kHz,脉冲宽度为 1 μ s。激光器输出的脉冲序列如图 2(b) 所示,可以

看到脉冲序列的包络为调 Q 脉冲形状,每个脉冲的幅值由其在调 Q 脉冲内的位置所决定,脉冲的峰值功率由于调 Q 的存在而得到了提高,幅值最大的脉冲峰值功率大约为 10 W。脉宽约 20 ns,脉冲间隔约 130 ns,与图 2(a) 中的脉冲序列一致。抽运源为中心波长 980 nm,尾纤输出的半导体激光器,最大输出功率 150 mW。掺 Yb 光纤为标准单模光纤,芯径 6.2 μ m,该光纤在 980 nm 处的吸收系数为 30 dB/m。布拉格光栅的反射中心波长为 1052.6 nm,反射率 17 dB,带宽约 0.1 nm,光纤反射圈在 1053 nm 处的反射率为 16 dB,二者分别作为激光器的前腔镜和后腔镜,并在反射圈输出端测量激光的功率。透镜 1 和 2 为自聚焦准直透镜,从光纤出射的发散光经透镜 1 聚焦后变为平行光入射到声光调制器(AOM)上,通过声光调制器后的平行光再经透镜 2 聚焦耦合进光纤。实验中使用光谱仪 Anritsu MS9710 在 980/1053 波分复用器(WDM)的输出端观测激光的光谱特性,用 PIN 光电二极管和 Tektronix 200MHz 示波器在反射圈输出端观测脉冲激光的时域特性。

看到脉冲序列的包络为调 Q 脉冲形状,每个脉冲的幅值由其在调 Q 脉冲内的位置所决定,脉冲的峰值功率由于调 Q 的存在而得到了提高,幅值最大的脉冲峰值功率大约为 10 W。脉宽约 20 ns,脉冲间隔约 130 ns,与图 2(a) 中的脉冲序列一致。

为了分析调 Q 脉冲中存在的脉冲序列是由于调 Q 还是锁模产生,我们改变了腔长,在掺 Yb 光纤和声光调制器之间又加入 10 m 长的无源光纤。调制脉冲的重复频率为 250 kHz,脉冲宽度为 3 μ s。得到的脉冲序列脉宽约 20 ns,脉冲间隔约 220 ns,

峰值功率约为 5 W,如图 3 所示。

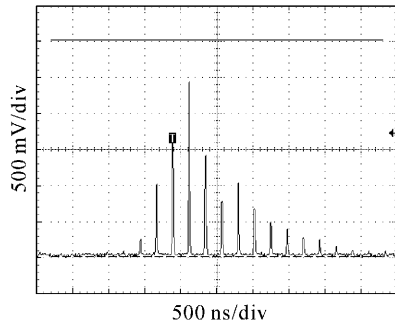


图 3 改变无源光纤长度后的自锁模脉冲序列
Fig. 3 Pulse train after changing fiber length

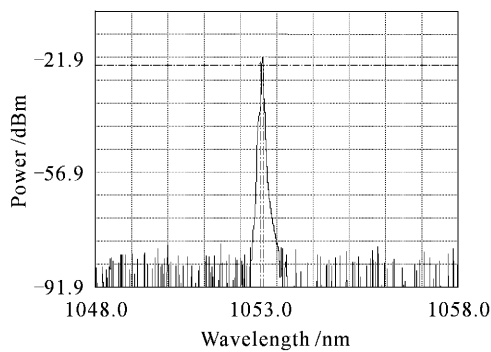


图 4 激光器输出的激光光谱图
Fig. 4 Output laser spectrum

与改变腔长前的实验结果相比,脉冲间隔增加了约 100 ns。按照锁模理论,相邻的锁模脉冲之间的间隔为: $\Delta t=2nL/c$,其中 L 为激光器的腔长, n 为增益介质的折射率, c 为真空中的光速。由此公式计算可得,当腔长增加 10 m 时,锁模脉冲的脉冲间隔应增加 100 ns,与实验结果吻合,这就基本证实了实验中观察到的脉冲序列是锁模脉冲序列。相应的激光光谱图如图 4 所示。

4 改进后的全光纤法布里-珀罗腔激光器

为了确定调 Q 声光晶体引入的频移是否是锁模脉冲产生的主要原因,改进了图 1 激光器的结构,如图 5 所示。抽运光源为中心波长 980 nm,尾纤输出的半导体激光器,最大输出功率 220 mW。腔内的掺 Yb 光纤为标准单模光纤,芯径 6.2 μm ,在 980 nm 波长处的吸收系数为 70 dB/m。第一个布拉格光栅的反射中心波长为 1052.8 nm,反射率 27.4 dB,带宽 0.4 nm。第二个布拉格光栅的反射中心波长为 1052.6 nm,反射率 22 dB,带宽 0.11 nm。实

验中仍然使用光谱仪 Anritsu MS9710 在 980/1053 波分复用的输出端观测激光的光谱特性,用 PIN 光电二极管和 Tektronix 200 MHz 示波器在光栅输出端观测激光的时域特性。

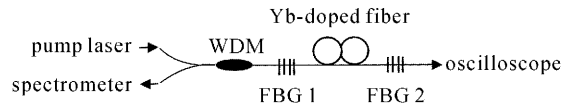


图 5 全光纤法布里-珀罗腔掺 Yb 光纤激光器的实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of all-fiber F-P cavity Yb-doped fiber laser

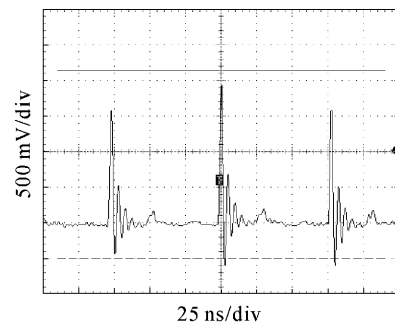


图 6 光栅作为腔镜的锁模脉冲序列
Fig. 6 Mode-locked pulse train with a fiber grating as a cavity mirror

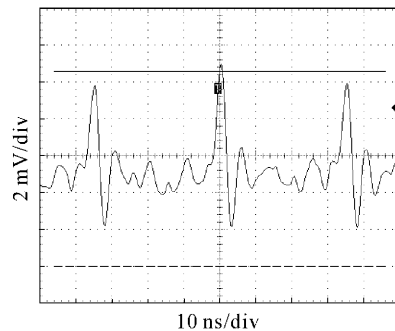


图 7 光纤长度变短时的锁模脉冲序列
Fig. 7 Pulse train with shorter fiber

5 连续锁模的实验结果

在图 5 实验装置中选用 8 m 长的掺 Yb 光纤,观察到了脉宽 2 ns 左右、脉冲间隔 75 ns 的锁模脉冲序列。采用 Tektronix 200 MHz 示波器记录脉冲序列,如图 6 所示。

把掺 Yb 光纤的长度由 8 m 减少到 2 m,得到的脉冲序列如图 7 所示。比较图 6 和图 7 不难看出,锁模脉冲脉宽变宽,脉冲间隔之间的曲线不平坦,脉冲边缘不光滑,激光器的锁模现象变得不明显。

为了观察抽运功率的改变对锁模脉冲的影响,在图 5 所示的实验装置图中去掉波分复用器以减少对抽运光的损耗,发现当抽运功率增加到一定值(约 160mW)以后,随着抽运功率的进一步升高,锁模的效果反而随之变差,也即出现了脉冲不光滑,脉宽变宽等现象。

接着采用不同的反射器件作为激光器的腔镜以研究光栅在锁模脉冲形成中的作用。首先采用反射中心波长为 1053.14 nm,反射率 29.8 dB,带宽为 0.52 nm 的光栅作为前腔镜,用在 1053 nm 处的反射率为 16 dB 的光纤反射圈作为后腔镜,腔内光纤为 7 m 长的掺 Yb 光纤,得到的锁模脉冲序列如图 8 所示。当抽运功率为 220 mW 时,最大峰值功率为 0.2 W。相对较低的峰值功率很大程度上是由于腔镜的反射率较高造成的。接着采用两个光纤反射圈作为腔镜,也得到了锁模脉冲,如图 9 所示。两个光纤反射圈在 1053 nm 处的反射率约为 16 dB,带宽为 50 nm。与图 8 相比,图 9 中所示的锁模脉冲效果略差。这是因为光纤反射圈的反射带宽较宽,激光器内有两个振荡波长,导致锁模效果变差。

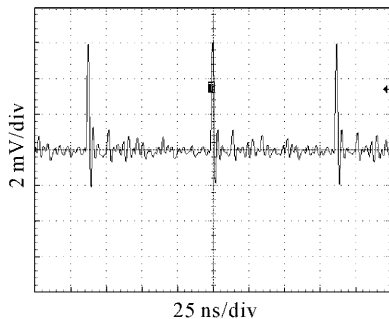


图 8 光栅和光纤反射圈作为腔镜时的锁模脉冲
Fig. 8 Pulse train with a fiber grating and a fiber reflector as cavity mirrors

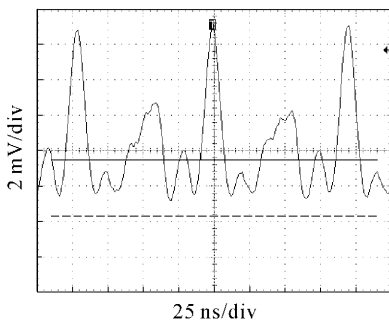


图 9 用光纤反射圈作为腔镜时的锁模脉冲
Fig. 9 Pulse train with fiber reflectors as cavity mirrors

6 分析和讨论

对于调 Q 光纤激光器中锁模现象的产生主要有两种解释:一是由声光调制器引入的相移产生^[11],二是由光纤中的自相位调制效应产生^[12]。本实验中,不管声光调制器是否存在,都能产生锁模,因此前者不是本文中锁模产生的主要原因。第二种解释是 P. Myslinski 等^[12]提出的。他们在声光调 Q 掺钕光纤激光器中通过改变反射镜的放置方式观察到了调 Q 中产生的自锁模。计算色散长度和非线性长度后,他们认为自相位调制是产生锁模的主要原因(因为计算出的非线性长度和脉冲传播的长度是可以比拟的)。自相位调制的存在使得光脉冲的频谱被展宽,当这种展宽和腔的模式间隔相差不多时,腔内的模式便能相互作用,直到它们之间产生一个固定的相位关系,也即形成锁模。

非线性长度 L_{NL} 由下式给出^[13]

$$L_{NL} = 1/(\gamma P_0), \quad (1)$$

其中 $\gamma = 2\pi n_2/(\lambda_0 A_{eff})$ 。 P_0 为腔内脉冲的峰值功率, λ_0 为真空中的脉冲波长, n_2 为熔融二氧化硅的非线性系数, $A_{eff} = \pi\omega_0^2/2$, 是有效纤芯截面, 其中 ω_0 为模场半径。对于本实验中的典型脉冲, $\omega_0 \approx 6 \mu\text{m}$, $P_0 = 500 \text{ W}$ (由输出功率和腔镜反射率计算得出), $\lambda_0 = 1.053 \mu\text{m}$, $n_2 \approx 2.7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ^[14]。由此计算出的非线性长度为 0.75 m, 相对于实验中采取的 6 m 长的掺 Yb 光纤, 二者是可比拟的。因此, 自相位调制有可能促成实验中调 Q 光纤激光器中锁模的产生, 这可以解释为什么锁模的产生和掺 Yb 光纤的长度、浓度有直接关系。

上述原因是针对调 Q 光纤激光器而言的, 在这类激光器中, 连续光已经通过声光调制器转换成了脉冲光, 再结合脉冲光在光纤中传播时的自相位调制效应, 为锁模脉冲的产生提供了可能。但在连续工作的光纤激光器中同样观察到了锁模现象, 在这类激光器中, 就不能单纯地用自相位调制效应来解释锁模的产生。另外, 如果自相位调制是产生锁模的唯一主要原因, 那么根据非线性效应产生的原理, 当抽运功率越大时, 产生的非线性效应就应该越显著, 相对应的锁模效果也就应该越好。但在我们的实验中, 当抽运功率超过某一特定值后, 锁模效果反而变差, 这也从另一个方面证明只用自相位调制不能很好地解释锁模脉冲的形成。

7 结 论

在调 Q 和连续工作的掺 Yb 光纤激光器中均观察到了清晰的自锁模脉冲序列,其中自相位调制效应能够很好地解释调 Q 光纤激光器中的自锁模现象。在此基础上,我们去掉了声光调制器,并改变腔结构,形成了连续工作的掺 Yb 光纤激光器,这时仍然可以观察到自锁模脉冲序列,但这时自相位调制效应已经不能完全解释锁模的产生。经过详细的比较和分析实验结果,发现锁模脉冲的产生和掺 Yb 光纤的长度、浓度及抽运功率的大小有关。至于锁模脉冲的产生过程中是否还有其他因素发挥了作用,还有待进一步的实验和理论分析。与其他方法相比,这种简单的新方法具有结构紧凑、受环境影响小,易于发生等优点,相信经过进一步的改进可获得脉宽更窄的锁模脉冲并有更广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 J.-N. Maran, S. LaRochelle, P. Besnard. Erbium-doped fiber laser simultaneously mode locked on more than 24 wavelengths at room temperature [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(21): 2082~2084
- 2 A. G. Bulushev, E. M. Dianov, O. G. Okhotnikov. Self-starting mode-locked laser with a nonlinear ring resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(2): 88~90
- 3 Song Wu, Jefferson Strait, Richard L. Fork *et al.*. High-power passively mode-locked Er-doped fiber laser with a nonlinear optical loop mirror [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(17): 1444~1446
- 4 W. H. Loh, D. Atkinson, P. R. Morkel *et al.*. All-solid-state subpicosecond passively mode locked erbium-doped fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(1): 4~6
- 5 C.-J. Chen, P. K. A. Wai, C. R. Menyuk. Self-starting of passively mode-locked lasers with fast saturable absorbers [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(4): 350~352
- 6 O. G. Okhotnikov, L. Gomes, N. Xiang *et al.*. Mode-locked ytterbium fiber laser tunable in the 980~1070-nm spectral range [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17): 1522~1524
- 7 Lasse Orsila, Luis A. Gomes, Ning Xiang *et al.*. Mode-locked ytterbium fiber lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(9): 1902~1906
- 8 Peng Can, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. 10 GHz actively mode-locked fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 101~104
彭 璨,姚敏玉,张洪明 等. 10 GHz 主动锁模光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 101~104
- 9 Zhaoying Wang, Zhenghong Yu, Chunfeng Ge *et al.*. Figure-eight actively-passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(3): 128~130
- 10 Yang Shiquan, Li Zhaohui, Xiang Yang *et al.*. Wavelength tunable dual-wavelength actively mode-locked fiber laser with F-P LD as modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 472~475
杨石泉,李朝晖,项 阳 等. 用半导体激光器作调制器的双波长可调谐锁模光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 472~475
- 11 C. Chapin Culter. Why does linear phase shift cause mode locking? [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(1): 282~288
- 12 P. Myslinski, J. Chrostowski, J. A. Koningstein *et al.*. Self mode-locking in a Q-switched erbium-doped fiber laser [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(3): 286~290
- 13 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 42~43
G. P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用* [M]. 北京: 电子工业出版社 2002. 42~43
- 14 D. Milam, M. J. Weber. Measurement of nonlinear refractive-index coefficients using time-resolved interferometry: Application to optical materials for high-power neodymium lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**(6): 2497~2501