

文章编号: 0253-2239(2003)11-1341-5

8 字形主被动锁模掺 Er^{3+} 光纤激光器*

王肇颖 余震虹 高培良 贾东方 杨天新 葛春风 张瑞峰 丁永奎 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在理论上分析了利用非线性光学环形镜作为等效可饱和吸收体压缩脉冲进行锁模的物理机制。利用 8 字形主被动混合锁模的结构在调制频率 2.498749 GHz 下, 在 1.543 μm 处获得了 12 ps 的锁模脉冲输出, 对应谱宽 0.22 nm, 时间脉宽 0.33。在抽运功率 50 mW 情况下, 输出脉冲平均功率 3.715 mW。在调制频率 2.499344 GHz、2.499114 GHz 和 2.498999 GHz 时分别并获得了 2~4 阶幅度较为均衡的有理数谐波锁模脉冲序列。

关键词: 光纤激光器; 非线性光学环形镜; 主被动锁模; 8 字形

中图分类号: TN253

文献标识码: A

1 引 言

光纤锁模激光器由于能产生稳定的高重复频率 1.55 μm 超短光脉冲, 已成为高速光纤通信系统中极具潜力的一种光源。锁模机制主要包括主动锁模、被动锁模以及主被动混合锁模三种^[1]。目前, 直接调制的主动锁模光纤激光器输出脉冲的重复率最高达到了 40 GHz, 脉冲宽度为 3.5 ps^[2]。1999 年, 西安光机所报道的利用非线性偏振旋转被动锁模光纤激光器达到输出最短脉宽 269 fs, 重复率 21.37 MHz 的水平^[3]。主动锁模光纤激光器具有输出脉冲啁啾小、重复率高且输出功率较高的特点, 2003 年, 彭璨等利用电吸收调制器和半导体光放大器得到脉宽 10 ps 的 10 GHz 主动锁模输出^[4], 但是其稳定技术复杂且输出脉冲脉宽比较宽, 而利用光纤在激光器外部压缩输出脉冲则使压缩后的光脉冲有明显的底座, 不适合进行长距离传输。被动锁模光纤激光器输出脉宽相对较窄, 结构简单, 但是输出脉冲重复率受光纤长度的限制不可能很高, 不易调整和控制^[5]。采用主被动混合方式可以有效地克服二者的缺点。1994 年, Carruthes 等^[6]利用此技术从单偏振掺铒光纤激光器中产生了重复率 0.5 GHz 的亚皮秒锁模脉冲; 1997 年, Jones 等^[7]得到了能量达 1.2 nJ (平均功率 20 mW) 的锁模脉冲, 脉宽约 1.5 ps; 最近, Li 等^[8]采用非线性放大环镜作可饱和

吸收体, 利用谐波锁模技术, 获得了重复频率 11.08 GHz, 脉宽 7.1 ps 的近变换限脉冲。国内对主被动混合锁模光纤激光器的报道尚很少见。我们采用“8”字形主被动混合锁模光纤激光器, 既可以获得高且稳定的输出重复率, 又可以通过 8 字腔中的非线性光纤环形镜 (NOLM) 得到窄脉冲输出。在重复率 2.498749 GHz 时, 获得了 12 ps 的脉冲输出, 中心波长 1543 nm, 相应的频谱宽度 0.22 nm。

2 理论分析

由一个作为可饱和吸收体的非线性环形镜 (NOLM) 和作为主动锁模元件的电光调制器构成的“8”字腔主被动锁模光纤激光器如图 1 所示。

根据非线性光纤环形镜的理论, 非线性光学环形镜的入射光功率 P_{in} 与透射率 T 的关系为^[1]

$$T = 1 - R = 1 - 2\alpha(1 - \alpha) \{1 + \cos[(1 - 2\alpha)P_{\text{in}}2\pi n_2 L / \lambda]\}, \quad (1)$$

其中, α 为耦合器的分束比, n_2 为光纤的非线性克尔系数, L 为非线性光学环形镜的长度, λ 为入射光脉冲波长, P_{in} 为入射光功率。透射光功率与入射光功率随 α 的变化关系曲线如图 2 所示。

图 2 表明, 非线性光学环形镜对输入光波具有非线性调制特性。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吸收效应, 使输入光脉冲经过透射后得到压缩。

* 教育部博士点基金(1999005615)、国家自然科学基金(69877012)资助课题。

E-mail: wangdd@eyou.com

收稿日期: 2002-09-19; 收到修改稿日期: 2002-11-22

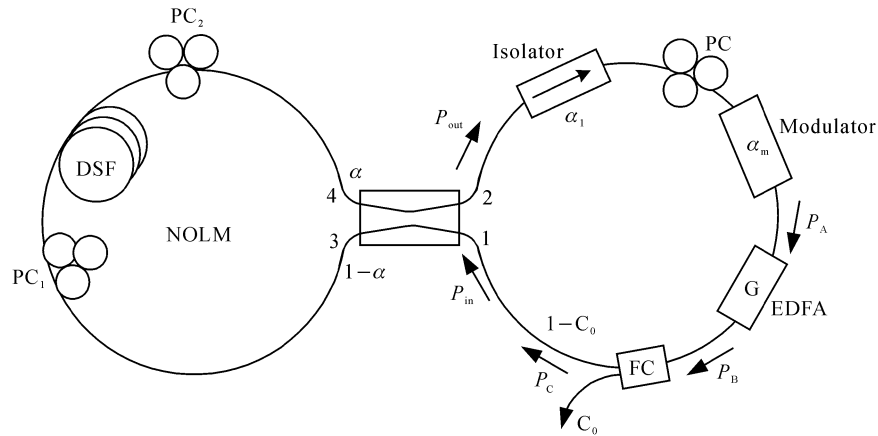


Fig. 1 Schematic of the figure-eight actively-passively mode-locked fiber laser

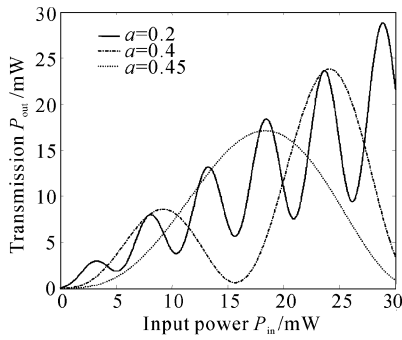


Fig. 2 Transmission characteristic of the NOLM for different input power and α

当输入光功率大于第一个透射峰对应的光强时,透射光将展宽并且发生分裂,假设入射光脉冲为高斯型:

$$E_{in} = E_0 \exp\left(-\frac{t^2}{t_0^2}\right), \quad (2)$$

图 3 给出了入射高斯脉冲与透射脉冲的曲线,同时我们发现随着入射脉冲光强的进一步增大,透射光脉冲分裂的程度加大,如图 3(b)所示。

当非线性光学环形镜用作激光腔反射器时,脉冲沿光纤传播的详细情况比较复杂。Duling 等^[9]报道了一种理论分析方法,下面我们尝试一种简单的分析方法,来处理混合锁模光纤激光器的功率。

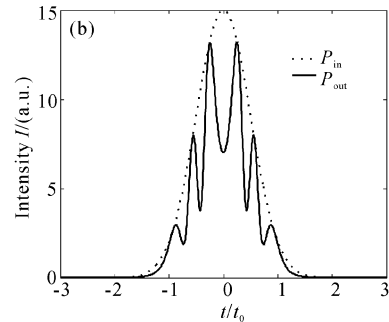
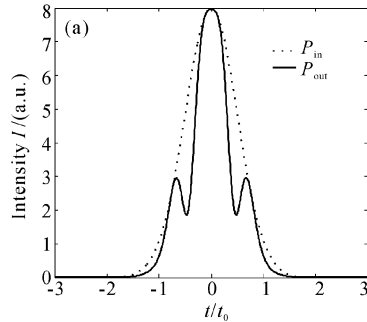


Fig. 3 Split curves of NOLM transmitted pulse for different input power

在图 1 中右边的主腔内,经过每一个光器件后的激光功率可写为

$$P_A = P_{out} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_m, \quad (3)$$

$$P_B = G \cdot P_A = G \cdot P_{out} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_m, \quad (4)$$

$$P_C = P_B \cdot (1 - C_0) = G \cdot P_{out} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_m (1 - C_0), \quad (5)$$

其中 α_1 和 α_m 分别是隔离器和调制器的损耗系数, G 是主腔中的光放大增益, C_0 是输出耦合器光纤耦合器的分光比.若忽略光纤连接、偏振控制器和(5)式中其他器件的额外损耗,或把它们分别折合到 α_1 和 α_m 中,可以写出激光器稳定工作状态下的方程:

$$P_{in} = P_C = P_{out} \cdot G \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_m \cdot (1 - C_0). \quad (6)$$

当非线性光学环形镜输出光强达到最大值时,相应的输出和输入峰值功率相等,即

$$P_{out}^{peak} = P_{in}^{peak}. \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式,可得

$$P_{in} = P_{in} \cdot G \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_m \cdot (1 - C_0), \quad (8)$$

则有

$$G \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_m \cdot (1 - C_0) = 1, \quad (9)$$

(9)式表明,典型的激光振荡要求光纤激光器腔内总增益必须能抵消腔内总损耗.如果没有环路增益,非线性光学环形镜透过率总小于或等于 1,结果导

致光脉冲每经过一次非线性光学环形镜,其能量就有一定程度的减弱,最终非线性光学环形镜将逐渐失去其调制特性。

3 实验结果

实验装置如图 1 所示,耦合器 1 的分束比为 20:80。在非线性光学环形镜中采用色散位移光纤光纤,除了增大非线性之外,色散位移光纤降低了两束光在空间上的展宽,提高了它们在耦合器处的重叠率,从而获得最大的透射率,减小反射损耗。实验中色散位移光纤的长度为 100 m。调制器为 IOC 公司的 2.5 GHz M-Z 型 LiNbO₃ 调制器;增益由 IREPOLUS 公司的 EAD60 型光纤放大器提供,输出带宽为 1530~1570 nm,饱和输出功率为 18 dBm;输出耦合器分束比为 10:90;偏振状态由偏振控制器控制;射频调制信号源是 HP 公司的 83752 型频率合成器;数字取样示波器为 HP 公司的 83480A 型数字通信分析仪;光谱仪是 Anstru 公司的 MS9001A 型光谱仪,最小分辨力 0.1 nm。

图 4 是调制频率为 2.498749 GHz 下输出的主被动混合锁模的脉冲波形和光谱图,此时对应的调制器的静态偏压为 6 V,调制器射频驱动功率为 -0.5 dBm。输出脉冲宽度由示波器判读为 20 ps,考虑示波器响应时间和取样平均 2 次,其脉宽实际为 12 ps,对应脉冲谱宽为 0.22 nm,中心波长

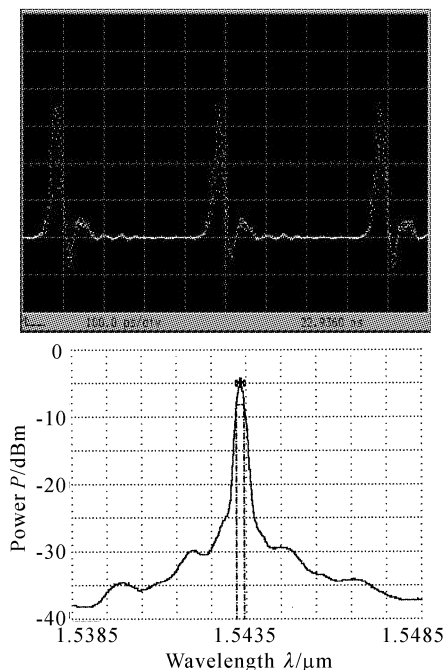


Fig. 4 Mode-locked pulse train and spectrum of actively-passively mode-locked fiber laser

1543 nm,时间带宽积为 $\Delta T \cdot \Delta \nu = 0.33$ 。

图 5 为掺铒光纤放大器的输出功率与激光器的输出功率之间的关系曲线。当掺铒光纤放大器输出功率达到 50 mW 时,激光器的输出功率为 3.715 mW。获得连续光输出时的掺铒光纤放大器阈值仅为 1 mW,可见采用具有不等分束比的耦合器,可以使激光器的阈值很低。锁模脉冲形成之后,降低掺铒光纤放大器的输出功率至 3mW,激光器仍可维持锁模脉冲输出。

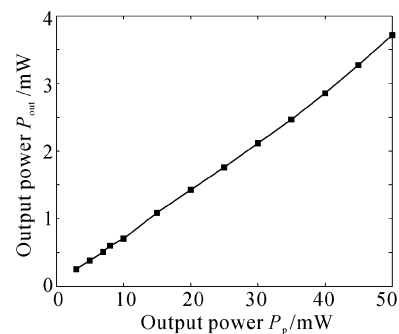


Fig. 5 Output power of fiber laser versus output power of EDFA

另外,在调制频率 f_m 分别为 2.499344 GHz[即 $f_m = (181^{3+} + 1/2)f_0$,其中 f_0 是腔基频,实验测得为 1.378188 MHz],2.4991137 GHz[(1813+1/3) f_0]和 2.498999 GHz[(1813+1/4) f_0]时观察到了二、三、四阶有理数谐波锁模输出,其锁模脉冲波形和光谱图分别见图 6~图 8。

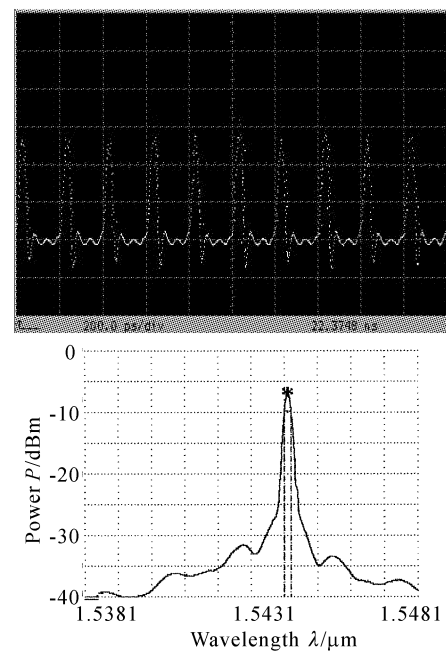


Fig. 6 Output pulse train and spectrum of 2RH from actively-passively mode-locked fiber

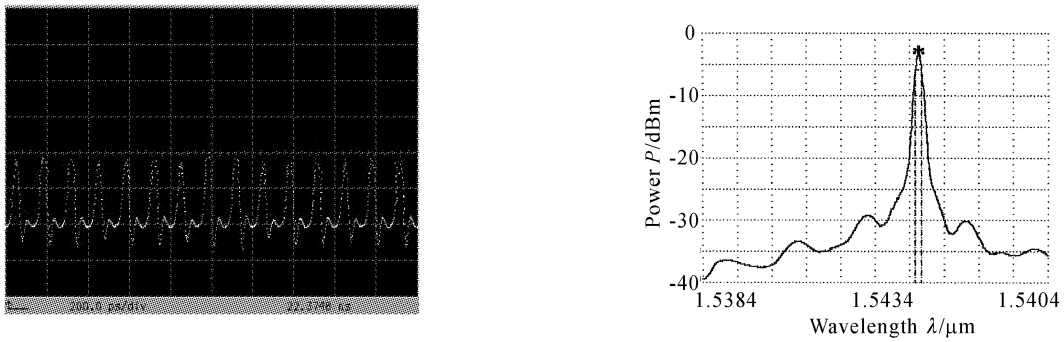


Fig. 7 Output pulse train and spectrum of 3RH from actively-passively mode-locked fiber

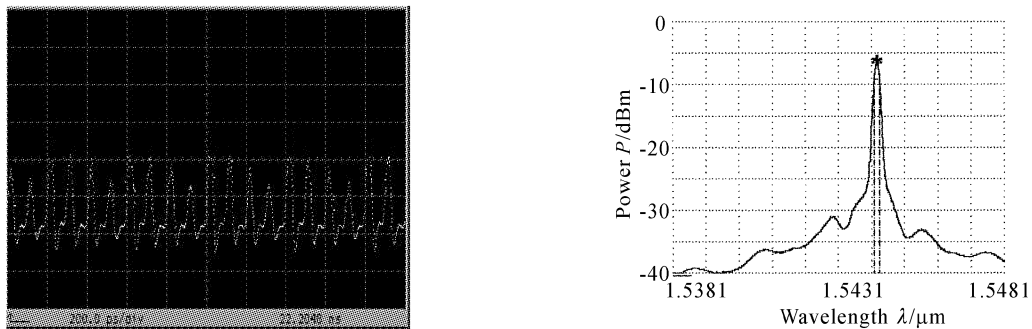


Fig. 8 Output pulse train and spectrum of 4RH from actively-passively mode-locked fiber

4 讨 论

在实验中我们发现,锁模脉冲的稳定性主要受腔长漂移影响。由于腔长比较长,它随温度、外界应力的变化比较明显。当激光器长时间运转在锁模输出状态时,其输出的中心波长会发生微小的漂移,如图9所示。这是由于锁模的射频调制频率为

$$f_{\text{mod}} = \frac{mc}{n(\lambda)L}, \quad (10)$$

其中 m 是整数, c 为真空中的光速, λ 是光波长, L 为腔长, n 是光纤折射率。调制频率一定时,如果腔长 L 因为外界的原因发生微小的漂移,为了维持一定的调制频率,将通过波长的微小移动来自适应这种变化。作为比较,我们还将非线性光学环形镜中的色散

位移光纤长度换成 2.5 km 进行了实验,其稳定性远远低于色散位移光纤长度为 100 m 时的情况。

此外,随机的偏振变化是影响锁模脉冲稳定性的另外一个原因。为了提高稳定性,我们在图1所示的被动环中又加入了一个偏振控制器 PC_2 ,这样可以有效抑制光纤中随机的偏振变化,实现激光器较长时间的稳定运转。此时,对工作平台施加扰动,输出脉冲不消失且仍然稳定。

我们在实验中没有观察到图3所示的脉冲分裂现象。我们认为这是由于主动环中的掺铒光纤放大器提供的是均匀加宽的增益,从而当一个中心频率的波长起振之后,抑制了其它波长的起振。

此外,我们将谐波锁模的结果与有关文献[10,11]报道的主动锁模状态下高阶谐波锁模脉

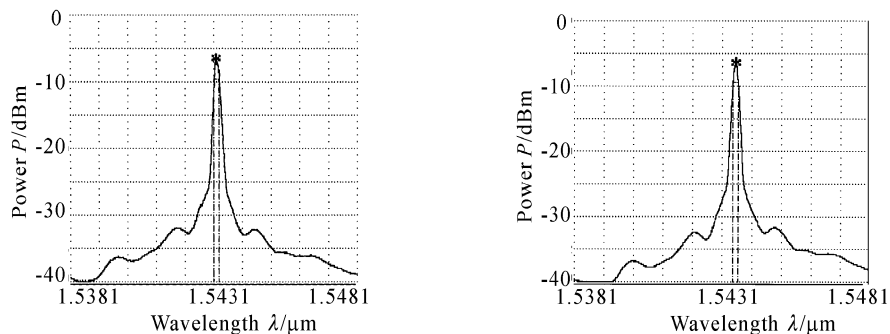


Fig. 9 Drift of output central wavelength

冲序列的输出波形相比较,可以清楚地看出经非线性光学环形镜作用后,由主被动锁模光纤激光器输出的高阶有理数谐波锁模脉冲序列的质量较未通过非线性光学环形镜作用时所得到的同样阶数的有理数谐波锁模脉冲序列质量有了明显提高,可见主被动锁模掺铒光纤激光器可以有效抑制腔内各种噪声对输出脉冲质量的影响并使脉冲窄化。

参 考 文 献

- 1 Agrawal G P. Applications of nonlinear fiber optics. Academic Press, University of Rochester, 2001
- 2 Pfeiffer T, Veith G. 40 GHz pulse generation using a widely tunable all-polarisation preserving erbium fibre ring laser. *IEEE Electron. Lett.*, 1993, **29**(21):1849~1850
- 3 Matsas V J, Newson T P, Richardson D J *et al.*. Selfstrating passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation. *IEEE Electron. Lett.*, 1992, **28**(15):1391~1393
- 4 Peng Can, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. 10 GHz actively mode-locked fiber ring laser. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **A30**(2):101~104 (in Chinese)
- 5 Wu Xiaoying and Li Shichen. Modelock fiber laser. *Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 1997, **8**(2):36~40 (in Chinese)
- 6 Carruthes T F, Duling I N, Dennis M L. Active-passive modelocking in a single-polarisation erbium fibre laser. *IEEE Electron. Lett.*, 1994, **30**(13):1051~1053
- 7 Jones D J, Nelson L E, Haus H A *et al.*. Diode-pumped environmentally stable stretched-pulse fiber laser. *IEEE Sel. Topics Quant. Electron.*, 1997, **3**(4):1076~1079
- 8 Li Shenping, Lou Caiyun, Chan K T. Rational harmonic active and passive modelocking in a figure-of-eight fiber laser. *IEEE Electron. Lett.*, 1998, **34**(4):375~376
- 9 Duling I N III, Chen C J, Wai P K A *et al.*. Operation of a nonlinear loop mirror in a laser cavity. *IEEE Quant. Electron.*, 1994, **30**(1):194~199
- 10 Wang Lin, Yu Jinlong, Ma Xiaohong *et al.*. 1.4~6 GHz erbium doped fiber laser using rational harmonic mode-locking technique. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1999, **48**(5):876~881 (in Chinese)
- 11 Song Lijun, Li Shichen, Ge Chunfeng *et al.*. Generation of amplitude-equalized pulses from rational harmonic mode-locked fiber ring laser. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(10):881~884 (in Chinese)

Figure-Eight Shape Actively and Passively Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Laser

Wang Zhaoying Yu Zhenhong Gao Peiliang Jia Dongfang Yang Tianxin
Ge Chunfeng Zhang Ruifeng Ding Yongkui Li Shichen

(Laboratory of Optoelectronics Information Technical Sciences and Technology,
College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 19 September 2002; revised 22 November 2002)

Abstract: The advantages of using NOLM as saturable absorber to compress pulse in mode-locked fiber lasers are analyzed theoretically. Experimentally the NOLM is placed in an actively mode-locked erbium-doped fibre ring laser to form a figure-eight actively and passively mode-locked fibre laser. 12 ps mode-locked pulses centered at 1.543 μm were obtained at the modulation frequency of 2.498749 GHz, with time-bandwidth product of 0.33. 3.715 mW output power is achieved with 50 mW pump power. Meanwhile, 2~4 rational harmonic (RH) mode-locked pulses with uniform amplitude were obtained at the modulation frequency of 2.499344 GHz, 2.499114 GHz, and 2.498999 GHz respectively.

Key words: fiber laser; nonlinear optical loop mirror (NOLM); active-passive mode-locking; eight-figure