

锁模光纤激光器在高速光通信中的应用研究

许立新¹, 顾春¹, 王安廷¹, 纪帆¹, 卫炳江², 明海¹

(1. 中国科学技术大学 物理系, 安徽合肥 230026; 2. 香港理工大学工程学院, 香港)

摘要:报道了锁模光纤激光器在高速光通信中应用的研究. 研制了 10 GHz 和 40 GHz 主动锁模光纤激光器, 获得了 2 ps 左右脉宽, 时间抖动 160 fs 的高稳定性锁模脉冲序列. 该锁模光纤激光器在高速光通讯系统全光时钟提取的应用中表现出码速透明的特征.

关键词: 光纤激光器; 锁模; 全光时钟提取; 光通讯

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A

Mode-locked fiber laser and its applications in high-speed optical communication

XU Li-xin¹, GU Chun¹, WANG An-ting¹, JI Fan¹, WAI P. K. A.², MING Hai¹

(1. Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Faculty of Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

Abstract: Applications of mode-locked fiber laser in high speed optical communication are reported. 10 GHz and 40 GHz active mode-locked lasers were developed and with a pulse width of about 2 ps and timing jitter of 160 fs were obtained. Using our mode-locked fiber lasers, an all-optical clock recovery system is implemented with bit-speed transparency in the whole C-band.

Key words: fiber laser; mode-locked; all-optical clock recovery; optical fiber communication

0 引言

光纤激光器具有效率高、光束质量好、体积小、操作简便灵活以及光谱宽等优点,因此在通信、传感及国防等领域受到了广泛的关注^[1]. 随着半导体激光器泵浦技术、光纤技术及其他光纤器件技术的进步,光纤激光器的研究与应用已取得突破性的进展.

稀土掺杂光纤(如掺 Yb³⁺, Er³⁺ 光纤等)被认为是产生超短脉冲的理想激光介质^[2],其宽的增益光谱(如 Er³⁺ 光纤增益谱 1 530~1 610 nm, Yb³⁺ 光纤的增益谱 975~1 100 nm)以及低泵浦功率需求为锁模光纤激光器产生超短脉冲创造了必要条件. 掺

Er³⁺ 光纤锁模激光器既可以在通信窗口产生波长可调谐的高重复频率的接近傅立叶变换极限脉冲,同时也是非常有用的高速光信号处理光源. 主动锁模光纤激光器通常采用 LiNbO₃ 波导调制器或电吸收调制器(EAM)作为锁模元件以产生重复频率在 10 GHz 以上的脉冲光源^[3~6],它是高速光通信系统中重要的 RZ 光源,同时在全光高速时钟提取中也有着重要的应用^[7]. 本文讨论锁模光纤激光器在高速光通信中的应用.

1 主动锁模光纤激光器的构成

主动锁模光纤激光器可以产生脉宽在皮秒量

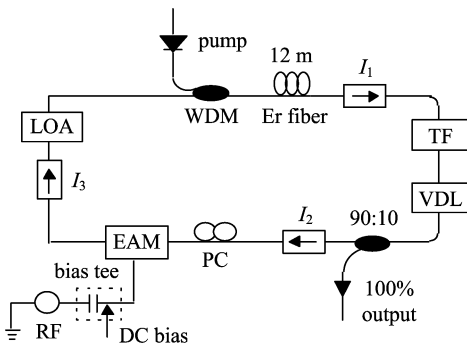
级、重复频率在 10 GHz 以上的光脉冲,在高速时钟提取或时分复用中有重要应用,本文报道了一种新型的主动锁模光纤激光器,它由电吸收调制器(EAM)、半导体线性放大器(LOA)及掺 Er^{3+} 光纤组成,分别实现 10 GHz 和 40 GHz 的锁模光纤激光输出,并将其应用于时钟提取实验中.图 1 为主动锁模光纤激光器实验装置图,由高速 EAM、12 m 掺 Er^{3+} 光纤、带通滤波器、3 个隔离器、980 nm/1 550 nm 波分复用器、9:1 耦合器和偏振控制器组成. EAM 的偏置电压为 1.015 V,射频(RF)驱动信号的峰峰值电压为 2 V,带通滤波器的带宽为 6 nm,其边模抑制比为 20 dB,腔内 3 个隔离器确保激光器单向工作,9:1 耦合器用于从腔内提取 10% 能量输出.电吸收调制器是一种半导体器件,它的光谱吸收特性随着外加电压的改变而发生变化,其低吸收电压和无啁啾或负啁啾特性非常适合用作锁模元件,然而当 EAM 与掺 Er^{3+} 光纤组合时,却难以实现高重复频率的锁模光纤激光器工作,原因是 Er^{3+}

的上能级 $^4I_{13/2}$ 的能级寿命较长,大约为 10 ms,与快响应的 EAM 组合时容易出现被动调 Q 现象,较高的 Q 脉冲能量使 EAM 饱和,这样 EAM 对外加的驱动信号不响应而导致锁模失效.当在腔内加入 LOA,由于 LOA 具有非常短的激发态寿命,因而阻止了 Er^{3+} 能级 $^4I_{13/2}$ 的粒子数的积累,使被动调 Q 无法建立,因而容易实现高重复频率的主动锁模,且可以获得大功率输出.

2 主动锁模激光器在全光时钟提取中的应用

当在图 1 中加入 10 GHz 的驱动源时,获得了稳定 10 GHz 锁模脉冲序列输出.采用 YOKOGAWA AQ7750 光学采样示波器测量输出脉冲宽度为 5 ps;用 Ando AQ6317B 光谱仪测得光谱宽度大约 1.8 nm,其时间带宽积为 1.125,表明输出脉冲有明显的啁啾;当在输出端接一段普通单模光纤时,脉冲宽度压窄至低于 2 ps,获得了接近傅立叶变换极限的脉冲序列.图 2(a)为用 AQ7750 测得的 10 GHz 的锁模脉冲序列,其输出峰值功率超过 120 mW,在腔内超过 1.2 W,测得时间抖动大约为 500 fs;图 2(b)为单个脉冲时间图,脉冲宽度约为 2 ps,通过调节 EAM 的偏置电压,脉冲宽度可在 1.8~10 ps 范围内变化.图 3(a)给出典型的锁模激光光谱,其光谱宽度大约 1.8 nm;图 3(b)给出锁模激光器的 RF 频谱,其 RF 频率为 9.954 GHz,边模抑制比优于 64 dB.

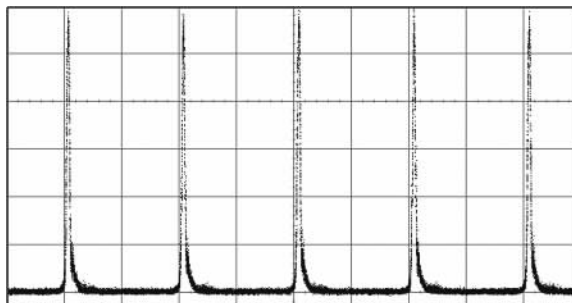
当外加 40 GHz 驱动源时,获得稳定的锁模脉冲序列.采用 AQ7750 光学采样示波器测量脉冲宽度 2.8 ps,测得其时间抖动为 160 fs,如图 4 所示.输出的锁模脉冲峰值功率 46 mW,平均功率 5.5



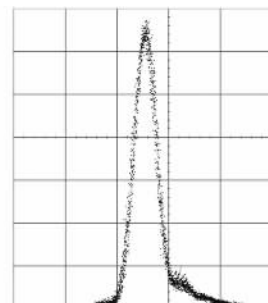
PC:偏振控制器;TF:可调谐带通滤波器; I_1 , I_2 , I_3 :隔离器;
EAM:电吸收调制器;LOA:半导体线性放大器;VDL:可调光延迟线

图 1 光纤环形腔锁模激光器实验装置

Fig. 1 The experimental setup of the mode-locked fiber ring laser



(a) 光学采样示波器观察到的 10 GHz 锁模脉冲序列(50 ps/div)



(b) 单脉冲波形,脉宽为 2.4 ps(5 ps/div)

图 2 光学采样示波器观察到的锁模脉冲时域特性

Fig. 2 Output pulses obtained from the optical sampling oscilloscope

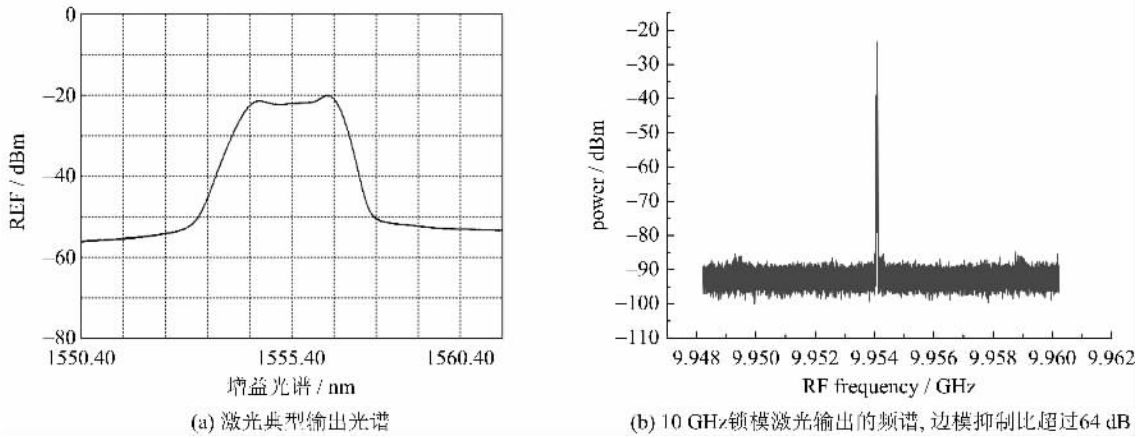


图 3 锁模光纤激光器输出的光谱和微波频谱特性

Fig. 3 Output optical spectrum and RF spectrum

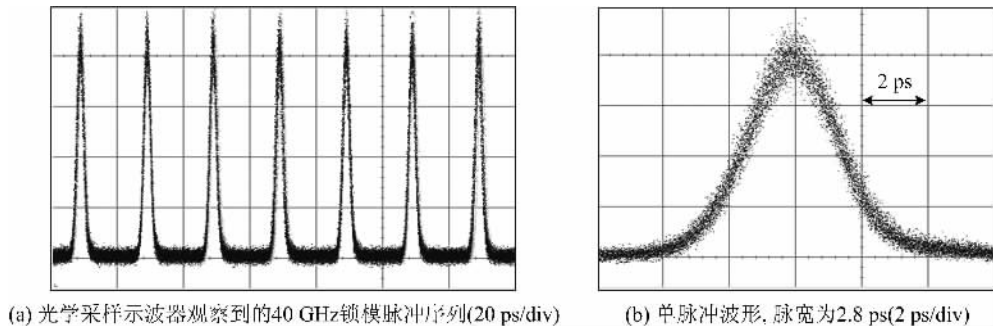


图 4 光学采样示波器观察到的锁模脉冲时域特性

Fig. 4 Output pulses obtained from the optical sampling oscilloscope

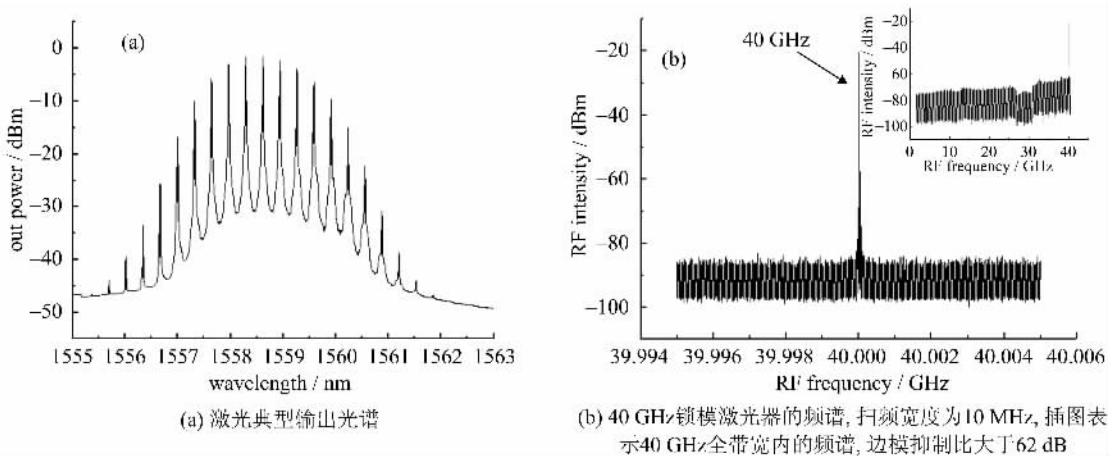


图 5 锁模光纤激光器输出的光谱和微波频谱特性

Fig. 5 Output optical spectrum and RF spectrum

mW, 对应于腔内 460 mW。图 5(a) 为相应的输出光谱, 光谱宽度 1.32 nm, 其时间带宽积为 0.46, 接近傅立叶变换极限。RF 频谱对应于 40 GHz, 如图 5(b) 所示, 表明锁模激光器的重复频率为 40 GHz, 其边模抑制比优于 62dB。

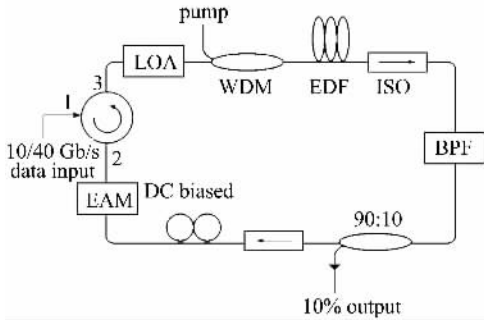
从以上实验结果可看出, 利用 EAM, LOA 和掺 Er^{3+} 光纤结合可获得稳定高重复频率的锁模激光序列, 该锁模激光光源可用作 10Gb/s、40 Gb/s 以及 40 Gb/s 以上光源。当把外驱动源去掉时, 该锁模装置可用作码速透明的高速时钟提取, 其结构装置

如图 6 所示. 当光信号通过环形器注入到 EAM 时, 光信号调制了 EAM, 即光信号代替原先的 RF 信号驱动了 EAM, 使激光器锁模工作, 当锁模激光器稳

定工作时, 输出的锁模脉冲序列正好是输入信号的时钟信号, 即获得了输入信号的时钟.

图 7 分别给出了输入光信号为 10 Gb/s 固定码信号 1001001010 时(图 7(a))及其提取出来的时间波形(图 7(c)), 提取出来的时钟信号重复频率 10 GHz, 其功率和脉宽分别为 150 mW 和 10 ps. 图 7 (b)输入光信号, 它是 10 Gb/s 的伪随机信号, 图 7 (d)给出了其对应的 10 GHz 提取时间波形, 功率和脉宽分别为 200 mW 和 6 ps. 图 8 给出了所对应的光谱图, 输入 10 Gb/s 光信号对应的波长是 1 546 nm, 提取出来的时钟信号波长可通过可调带通滤波器进行调谐, 图 8 对应的波长是 1 556. 3 nm. 值得注意的是, 时钟提取装置在一定程度上表现为码速透明的特征, 即当用 10 Gb/s 的光信号输入时, 获得 10 GHz 的相应时钟信号.

当输入 40 Gb/s 的光信号时(如图 9(a)所示),



PC: 偏振控制器; BPF: 6 nm 可调带通滤波器; ISO: 隔离器; EAM: 电吸收调制器; LOA: 半导体线性放大器

图 6 全光时钟提取实验装置

Fig. 6 Experimental setup of the all-optical clock recovery circuit

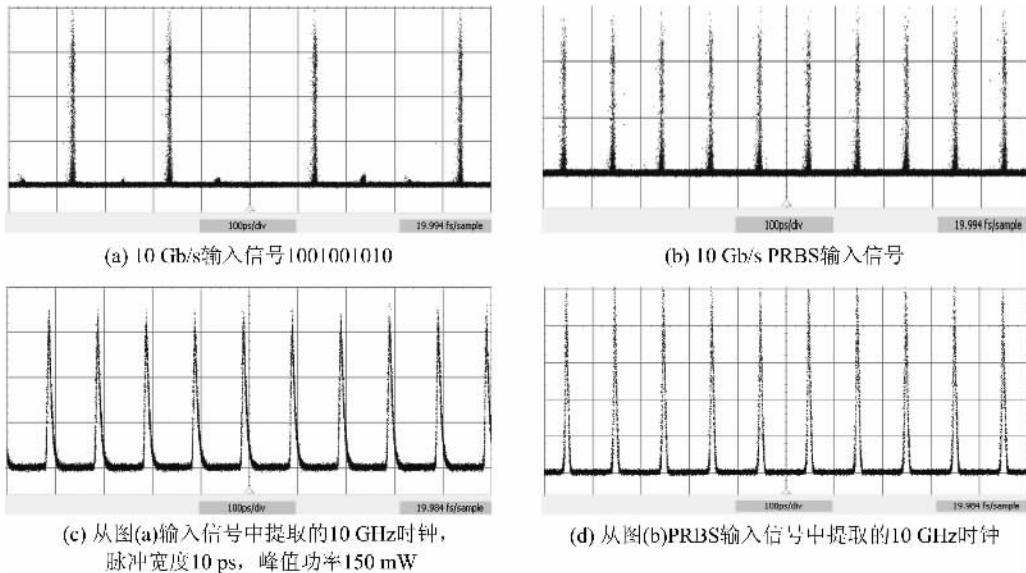


图 7 数据的时钟提取

Fig. 7 Timing diagram of input data and recovered optical clock

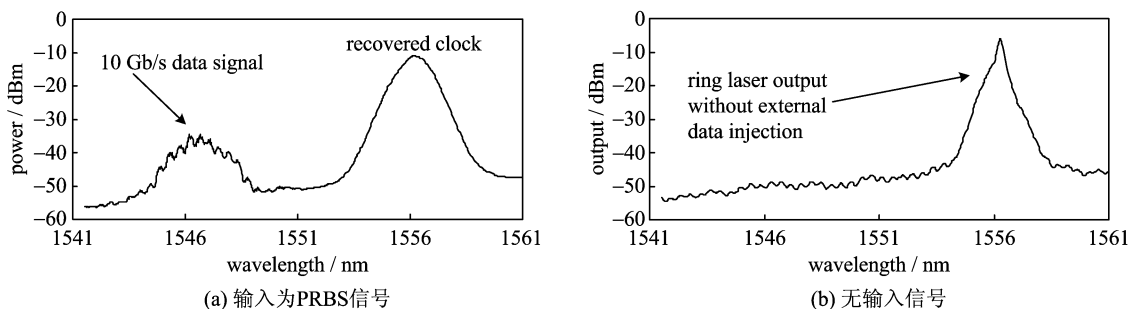


图 8 时钟提取的输出光谱

Fig. 8 Output optical spectrum of the clock recovery circuit

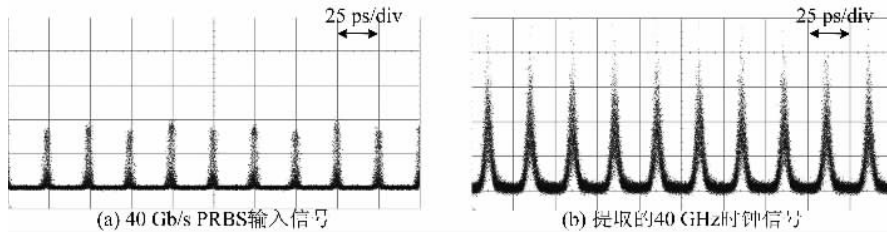


图 9 输入信号和提取的时钟信号

Fig. 9 Timing diagram of input data and recovered optical clock

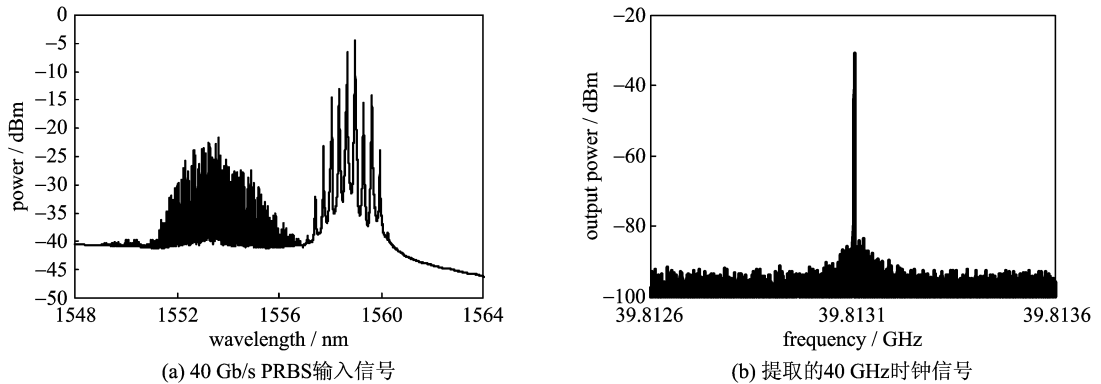


图 10 40 GHz 时钟提取的输出光谱

Fig. 10 Output spectrum of 40 GHz clock recovery

则获得 40 GHz 的相应时钟信号(如图 9(b)所示)。图 10 给出 40 Gb/s 时钟提取时对应的输出光谱和 RF 频谱,输入的 40 Gb/s PRBS 光信号对应的波长是 1 553 nm,输出时钟信号波长可调谐,图中对应 1 558 nm, RF 频谱对应 39.813 1 GHz,表明提取出来的时钟频率为 39.813 1 GHz。

从以上的研究中可以看出,当主动锁模光纤激光器用于全光时钟提取时,所获取的时钟是通过输入信号对 EAM 的光驱动来实现的,由于 EAM 对光的响应很快(一般可达 ps 量级),因此,我们的锁模光纤激光系统在全光时钟提取应用时,时钟频率范围可以很宽,即所谓的码速透明,实验中也观察到了 80 GHz 的时钟提取。

3 结论

本文对研制的高稳定性的 10 GHz 和 40 GHz 的主动锁模光纤激光器作了介绍,该锁模光纤激光器在高速光通讯系统全光时钟提取的应用中表现出了码速透明的特征。

参考文献(References)

[1] Zenteno L A, Walton D T. Novel fiber lasers and applications[J]. Optics & Photonics News, 2003, (3):

38-41, 62.

- [2] Fermann M E, Galvanauskas A, Sucha G, et al. Fiber-lasers for ultrafast optics[J]. Applied Physics, 1997, B65: 259-275.
- [3] Wey J S, Goldhar J, Burdge G L. Active harmonic modelocking of an erbium fiber laser with intracavity fabry perot filters [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(7): 1 171-1 180.
- [4] Haus H A, Ippen E P, Tamura K. Additive-pulse modelocking in fiber lasers [J]. IEEE Journal of Quantum electronics, 1994, 30(1): 200-208.
- [5] Xu L X, Lui L F K, Wai P K A, et al. 10 GHz actively mode-locked erbium-doped fiber ring laser using an electro-absorption modulator and a linear optical amplifier[C]// Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. Anaheim, California, 2006: OWI27.
- [6] Xu L X, Lui L F K, Wai P K A, et al. 40 GHz actively mode-locked erbium-doped fiber ring laser using an electro-absorption modulator and a linear optical amplifier[C]// Proceedings of Optical Fiber Communication and National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, California; IEEE Press, 2007: 1-3.
- [7] Lui L F K, Xu L X, Lee C C, et al. All-optical clock recovery using erbium-doped fiber laser incorporating an electroabsorption modulator and a linear optical amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(10): 720-722.