

文章编号: 0258-7025(2006)03-0293-05

基于半导体光放大器交叉增益调制效应的 主动锁模光纤激光器

戴科辉^{1,2}, 张新亮^{1,2*}, 徐帆^{1,2}, 黄德修^{1,2}

(¹ 华中科技大学光电子工程系, ² 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 提出一种腔内损耗小的基于半导体光放大器(SOA)交叉增益调制效应(XGM)的主动锁模光纤激光器结构。使用光环行器成功减小了激光器的腔内损耗,提高了激光器的输出功率。从理论上对有理数谐波锁模过程中腔内脉冲复合的物理机制进行了详细分析。利用有理数谐波锁模技术,在调制频率为 10 GHz 下,得到了重复频率为 30 GHz 的皮秒级光脉冲序列输出,其峰值功率约 0.5 mW。由于半导体光放大器的宽增益谱与滤波器的较大可调谐范围,使得激光器输出可以在较大的波长可调谐范围内保持较大功率输出。成功实现了调制频率为 20 GHz 的谐波锁模短光脉冲输出,可调谐范围达 40 nm,峰值功率大于 0.65 mW。半导体光放大器和激光器的短腔长保证了激光器的长期稳定性。

关键词 激光技术;光纤激光器;有理数谐波锁模;交叉增益调制;半导体光放大器

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Actively Mode-Locked Fiber Ring Laser Based on Cross-Gain Modulation Effect of Semiconductor Optical Amplifier

DAI Ke-hui^{1,2}, ZHANG Xin-liang^{1,2}, XU Fan^{1,2}, HUANG De-xiu^{1,2}

(¹ Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology,)
(² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract An actively mode-locked fiber ring laser based on cross-gain modulation (XGM) effect of semiconductor optical amplifier (SOA), with a small intracavity loss, is proposed and demonstrated. By using an optical circulator, the intracavity loss was reduced and the output power of the laser was increased. The physical mechanism of pulse multiplication in ring cavity during rational harmonic mode locking process has also been theoretically analyzed in detail. Taking advantage of rational harmonic mode locking technology, an optical pulse train with a repetition frequency of 30 GHz was obtained using a modulation frequency of 10 GHz, and the peak power was about 0.5 mW. With broad gain spectral width of SOA and large tuning range of filter, the output power of the output pulse train could keep big enough over a large tuning range. Harmonic mode locking at 20 GHz was successfully achieved and the peak power of the output pulse train was more than 0.65 mW over a 40 nm tuning range. The semiconductor optical amplifier and the short length of the ring cavity ensure the long-term stability of the laser.

Key words laser technique; fiber laser; rational harmonic mode locking; cross-gain modulation; semiconductor optical amplifier

1 引言

高重复频率超短光脉冲是光时分复用(OTDM)

系统和高速全光信号处理中的关键技术。利用环形腔激光器中的锁模是产生超短光脉冲的主要技术之一,一般可分为主动锁模和被动锁模两种。被动锁

收稿日期:2005-05-12;收到修改稿日期:2005-10-09

基金项目:国家 973 计划(G2000036605)、国家自然科学基金(60407001)和教育部新世纪优秀人才计划资助项目。

作者简介:戴科辉(1981—),男,湖南新邵人,华中科技大学光电子工程系博士研究生,主要从事超短光脉冲的研究。

E-mail: daikehui0607@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

模光纤激光器输出脉冲相对较窄,但受光纤长度的限制使其重复频率不可能很高,且不易调整和控制。主动谐波锁模是一种使调制频率等于谐振腔基频的整数倍,从而得到重复频率与调制频率相等的超短光脉冲产生技术。目前国内外成功实现的主动谐波锁模的光纤环形激光器一般基于 LiNbO_3 晶体的损耗调制或对半导体光放大器(SOA)进行直接调制^[1~4],腔内增益基本上是通过掺铒光纤放大器(EDFA)获得的。掺铒光纤放大器能提供较大增益,但几十米的掺铒光纤会使激光器稳定性较差。另外, LiNbO_3 调制器较强的偏振相关性也降低了光纤激光器的稳定性。而在对半导体光放大器进行直接调制的方案中,引入的啁啾较大,不得不在腔内加色散补偿光纤(DCF)或单模光纤(SMF)进行补偿,虽然色散补偿光纤或单模光纤在腔内起到波长自选择作用从而可省略滤波器,但同样增加了腔长,稳定性降低,也不紧凑,同时重复频率受到半导体光放大器直接调制频率不能过高的限制^[5]。另外,损耗调制容易引入超模噪声,需在环腔内加入半导体光放大器对其进行抑制^[4,6]。

最近 Kyriakos Vlachos 等^[7]成功实现一种基于半导体光放大器交叉增益调制效应(XGM)的主动谐波锁模光纤激光器。这种激光器中半导体光放大器除用作调制单元以进行锁模外,还替代了掺铒光纤放大器提供增益,从而大幅度减小了环形腔的长度,提高了腔的稳定性,同时还抑制了超模噪声。但一般这种方案中需要使用两个耦合器,环形腔激光器的损耗较大,输出功率不高。本文利用光环行器取代其中的一个耦合器将外部控制光脉冲引入环腔内,这样可减小环形腔内的损耗,获得更高的输出功率。外部控制光脉冲与内部激射光在半导体光放大器中相向传播^[7,8]。该方案结构紧凑,输出脉冲稳定,可工作频率高,具有很好的研究潜力。

2 实验方案与工作原理

2.1 实验方案

基于半导体光放大器交叉增益调制效应的环形腔激光器结构如图1所示。从分布反馈(DFB)半导体激光器输出的连续光经马赫-曾德尔调制器(MZM)调制后得到外部控制光信号,光信号的频率和码型可通过可调频率合成源和码型发生器(BPG)控制和调节,其输出光功率可通过掺铒光纤放大器

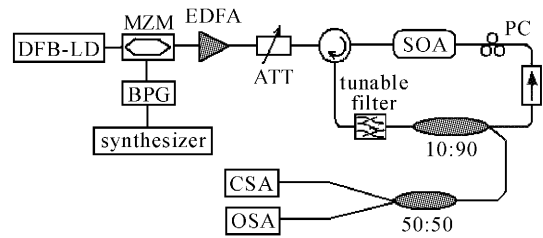


图1 基于半导体光放大器的主动锁模环形腔激光器实验装置

Fig.1 Experimental setup of actively mode-locked fiber ring laser based on SOA

和可调衰减器(ATT)进行控制。光环行器将外界控制光信号引入环形腔内,控制光信号上带有的强度调制信息会引起半导体光放大器的增益调制,进而引起环形腔内部增益的周期调制。可见半导体光放大器既是环形腔激光器的增益元件,又是引入环形腔增益周期性调制的元件。采用的半导体光放大器偏振相关性较好,在偏置电流为100 mA时,可提供约18 dB的小信号增益。偏振控制器(PC)用来对光信号偏振态进行调节,以获得最佳脉冲输出。注入环腔的外部控制信号经过半导体光放大器后受到隔离器的阻挡而不能在腔内继续传播,隔离器还可保证环形腔内激射光的单向传播。需要说明的是,外部控制光脉冲与内部激射光在半导体光放大器中相向传播。在本方案中没有利用可调谐延时线来调整腔长,而是利用可调谐频率源来调整外部控制光的频率,实验中采用的频率合成源在0~40 GHz范围内连续可调。此外,腔中的可调谐滤波器用来选择激光器的激射波长,其波长调谐范围是1525~1565 nm。超短光脉冲的输出通过一个9:1的耦合器来实现,10%的光输出,90%的光在环形腔内传播。一个3 dB耦合器再将激光器输出光信号分成两路,分别接入通信分析仪(CSA)和光谱分析仪(OSA)以进行测量分析。

实验系统中,激光器环形腔的腔长约20.0 m,基频为 $f_c = 10.0085$ MHz。利用光环行器替换光耦合器将外部调制信号引入腔内,减小了腔内光损耗,环形腔内总损耗约5.44 dB。在没有外部控制脉冲注入环形腔的情况下,将半导体光放大器驱动电流调至100 mA,适当调节衰减器(ATT)和偏振,在整个1515~1565 nm调谐范围内,可得到平均功率约1.6 mW的连续稳定的激光输出。

2.2 工作原理

2.2.1 谐波锁模

在本方案中外界控制光信号和环形腔内部激光在半导体光放大器中是相向传播的。控制光上带有周期的强度调制信息,由于半导体光放大器的交叉增益调制效应会引起环形腔内部增益的调制,进而引起输出光功率的调制。当控制光信号上的外部调制频率 f_m 为环形腔基频 f_c 的整数倍,即 $f_m = nf_c$ 时(n 为整数),在环腔中传播的不同频率模式之间相位一致,就可以实现主动谐波锁模。

2.2.2 有理数谐波锁模

有理数谐波锁模实质上是一种在谐波锁模的基础上进行脉冲复合的技术。在进行谐波锁模时,将调制频率失谐 $\frac{1}{p}f_c$,即 $f_m = (n + \frac{1}{p})f_c$ 时,则可得到重复频率为 pf_m 的锁模脉冲输出,其中 p 为整数。因 $(n + \frac{1}{p})$ 为非整数,振荡模在腔内不能匹配,但若将腔长等效地延长至 pL (这与激光光在腔内作 p 次往返等效),这时由于 $(n + \frac{1}{p})p$ 为整数,可实现模式与腔匹配。若将放大的等效腔再等分成 p 段,则图 2(a), (b), (c), (d) 中所示脉冲分布对应等效腔中的第 1, 2, 3, ..., p 段中在相应时刻的脉冲分布。根据谐振腔为环形这一特点,将各段分布层叠在一起,便可得到 $t = pT$ 时刻即第一个脉冲在腔内环行 p 周后腔内脉冲的分布情况,如图 2(e) 所示。 T 为脉冲

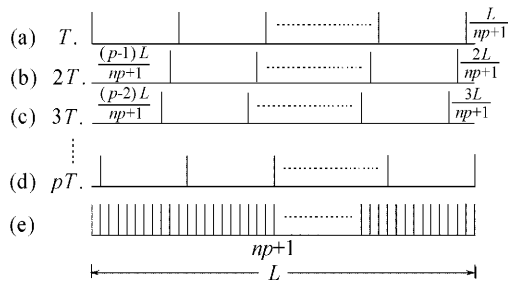


图 2 p 阶有理数谐波锁模过程中的脉冲复合 (a), (b), (c) 和 (d) 分别为 $0 \sim T$, $T \sim 2T$, $2T \sim 3T$ 和 $(p-1)T \sim pT$ 时间段内在 $t = T, 2T, 3T, \dots, pT$ 时刻锁模脉冲在腔内的分布; (e) 为 pT 时刻腔内所有脉冲的分布

Fig. 2 Illustration of pulse multiplication in p -order rational mode-locking process

(a), (b), (c) and (d) distribution of mode-locked pulses generated by external control pulses in ring cavity at $1T, 2T, 3T, \dots, pT$ within time-interval $0 \sim T, T \sim 2T, 2T \sim 3T$ and $(p-1)T \sim pT$, respectively; (e) distribution of all pulse overlap in ring cavity at pT

在腔内的往返时间, L 为腔长。所以进行有理数谐波锁模时,在光纤环形激光器中有 $(np + 1)$ 个脉冲在腔内振荡,每个脉冲在腔内往返 p 次后可以得到足够的放大并输出,从而可以得到重复频率为 $f_p = (np + 1)f_c = pf_m$ 的脉冲序列输出。

3 实验结果与分析

3.1 10 GHz 有理数谐波锁模

将外部调制频率调节到 10 GHz,然后对其微调后,可得到 2 阶与 3 阶有理数谐波锁模稳定输出 ($\lambda_c = 1557.38$ nm),输出光脉冲波形与光谱如图 3 所示。适当调节外部控制脉冲的功率与偏振控制器,可调整输出脉冲的脉宽与功率。在实验室环境下,腔长(主要是连接各元件的光纤)不受外界干扰,观察到 2 阶与 3 阶有理数谐波锁模脉冲序列在 4 h 内皆能保持稳定输出。

为了在激光器中对谐波锁模的脉冲进行 p 倍复合,需使调制频率失谐 $\frac{1}{p}f_c$,即实现 p 阶有理数谐波锁模。在 10 GHz 谐波锁模基础上,微调外部调制频率使其增加约 5.2087 MHz (约为环腔基频的 1/2),可得到重复频率 20 GHz 的 2 阶有理数锁模脉冲稳定输出,如图 3(b), (d) 所示。其脉冲峰值功率约 0.8 mW。而若将外部调制频率增加约 3.4440 MHz (约为环腔基频的 1/3),则可得到重复频率 30 GHz 的有理数锁模脉冲稳定输出,如图 3(c), (e) 所示。其脉冲峰值功率约 0.5 mW。

此外, $\Delta\nu_{\text{vac}}$ 为 10 GHz, 20 GHz 和 30 GHz,粗略计算可得对应的纵模间隔 $\Delta\lambda$ 分别为 0.081 nm, 0.162 nm 和 0.242 nm,三者之间也存在倍数关系。图 3(d), (e) 光谱中各纵模所对应的波长间隔分别为 0.165 nm, 0.245 nm,可见在实验和计算误差允许范围内,实验结果与理论基本相符。

值得注意的是,实验中进行 3 阶以上的有理数谐波锁模的输出脉冲序列具有明显的幅度不均衡现象,这主要是由于有限的载流子恢复速率造成的。由于载流子不能迅速恢复,在不同的时刻载流子浓度不一样,半导体光放大器增益不相同,因而输出功率也不相同。因而,随着有理数谐波锁模阶数的增加,载流子恢复速率远远跟不上载流子消耗速率,从而输出脉冲序列消光比下降,输出功率降低,幅度也越来越不均衡,4 阶以上有理数锁模输出脉冲质量明显恶化。

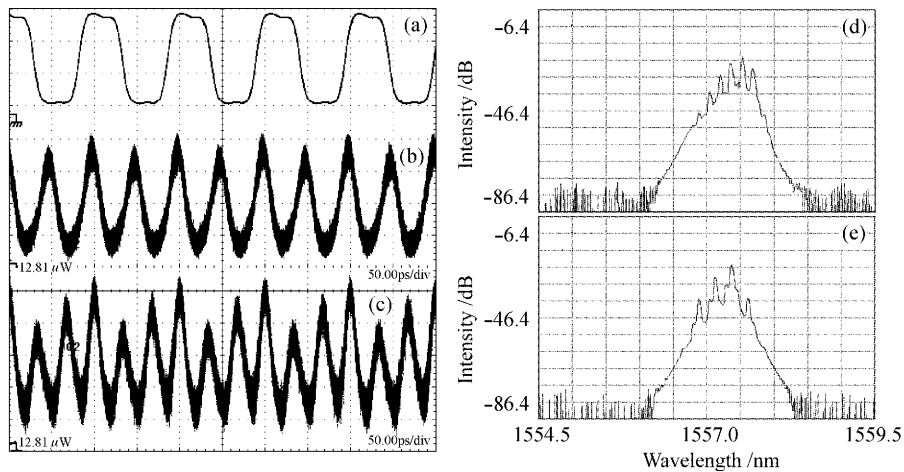


图 3 调制频率 10 GHz 时有理数谐波锁模输出

(a) 外部控制脉冲; (b) $p = 2$ 和 (c) $p = 3$ 时有理数谐波锁模输出的脉冲;
(d) $p = 2$ 和 (e) $p = 3$ 时有理数谐波锁模输出光谱

Fig. 3 Output pulses of rational harmonic mode-locking when modulation frequency was 10 GHz

(a) external control pulses; (b) output pulses of the rational harmonic mode-locking with $p = 2$; (c) output pulses of the rational harmonic mode-locking with $p = 3$; (d) output spectrum of the rational harmonic mode-locking with $p = 2$; (e) output spectrum of the rational harmonic mode-locking with $p = 3$

3.2 20 GHz 谐波锁模

将外部调制频率调至 20 GHz, 进行适当微调后, 可以得到重复频率 20 GHz 的谐波锁模脉冲的稳定输出, 输出光波形如图 4(b) 所示。输出脉冲峰值功率约 1.0 mW。图 4(c) 是对应的光谱, 具有很好的对称性, 相邻峰的间隔为 0.16 nm, 谱宽为 0.24 nm。

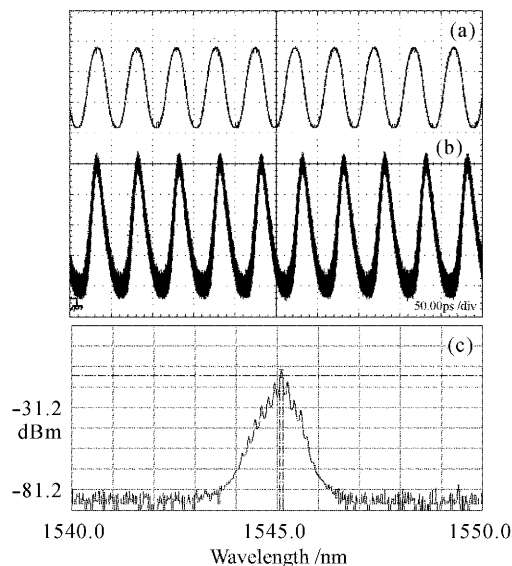


图 4 20 GHz 谐波锁模

(a) 外部控制脉冲; (b) 锁模脉冲; (c) 相应的光谱

Fig. 4 Harmonic mode-locking at 20 GHz

(a) external control pulses; (b) mode-locked pulses;
(c) corresponding optical spectrum

若假设脉冲为 sech^2 型的转换极限脉冲, 可粗略估算脉宽约为 11.6 ps。此外, 采用小信号增益更大的半导体光放大器也有利于得到功率更大、消光比更好的锁模脉冲输出。

半导体光放大器的宽增益谱使激光器的输出脉冲在一定的波长范围内可调谐。如图 5 所示, 20 GHz 谐波锁模输出脉冲在 40 nm (1525 ~ 1565 nm) 的波长范围内, 谱宽稳定在 0.24 nm 左右, 而输出功率则保持在 0.65 mW 以上。可见, 输出脉冲波长至少在 40 nm 的范围内可调。波长连续可调特性使得这种激光器在光时分复用/波分复用光通信网络系统中波长选择或切换更具灵活性, 也

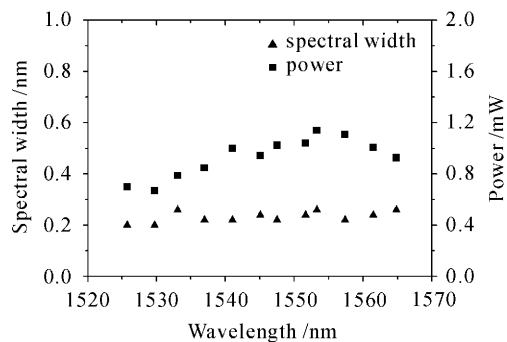


图 5 20 GHz 谐波锁模输出功率与谱宽随波长的变化情况

Fig. 5 Variation of the output power and spectral width versus wavelength

可用它替换现行的一些可调谐激光器。

4 结 论

研究了基于半导体光放大器中交叉增益调制效应的主动锁模光纤激光器, 利用光环形器代替传统方案中的光耦合器, 减小了环形腔的内部损耗, 分别实现了10 GHz的三阶有理数锁模和20 GHz的谐波锁模, 得到了高重复频率的超短光脉冲输出。20 GHz的谐波锁模输出能够在40 nm范围内可调。实验中得到的超短光脉冲输出稳定, 输出功率较大, 表明该方案在提高输出重复频率上具有进一步研究的价值。

参 考 文 献

- 1 Song Lijun, Li Shichen, Ge Chunfeng *et al.*. Generation of amplitude-equalized pulses from rational harmonic mode-locked fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10):881~884
宋立军, 李世忱, 葛春风等. 脉幅稳定的有理数谐波锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10):881~884
- 2 Zhang Jingsong, Li Tangjun, Qi Zanwei *et al.*. Continuously tunable multiwavelength actively mode-locked fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1):36~38
张劲松, 李唐军, 齐赞伟等. 连续调谐多波长主动锁模光纤激光器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1):36~38
- 3 E. Yoshida, M. Nakazawa. 80~200 GHz erbium doped fiber laser using a rational harmonic mode-locking technique [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(15):1370~1372
- 4 Chiming Wu, Niloy K. Dutta. High-repetition-rate optical pulse generation using a rational harmonic mode-locked fiber laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2):145~150
- 5 Lingze Duan, Mario Dagenais, Julius Goldhar. Smoothly wavelength-tunable picosecond pulse generation using a harmonically mode-locked fiber ring laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(4):930~937
- 6 Yu Jinlong, Dai Jufeng, Ma Xiaohong *et al.*. A novel all-optical clock recovery experiment for extracting clock signal from OTDM signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5):615~617
于晋龙, 戴居丰, 马晓红等. 时分复用信号中的全光时钟提取实验[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5):615~617
- 7 Kyriakos Vlachos, Chris Bintjas, Nikos Pleros *et al.*. Ultrafast semiconductor-based fiber laser sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**(1):147~154
- 8 Jian He, K. T. Chan. Generation and wavelength switching of picosecond pulses by optically modulating a semiconductor optical amplifier in a fiber laser with optical delay line [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(6):798~800