

文章编号: 0253-2239(2003)09-1082-4

有理数谐波锁模光纤激光器中脉冲幅度的均衡*

杨石泉 李朝晖 赵春柳 袁树忠 董孝义
(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 提出了一种在有理数谐波锁模光纤激光器中实现脉冲幅度均衡的新方法, 让脉冲在腔内循环一圈中往复通过调制器两次, 使调制器在腔内既作为锁模器件又作为脉冲幅度均衡器件。用时域分析的方法证明这种结构在调制器工作在其特性曲线的线性区时可以实现 5 阶以下有理数谐波锁模的脉冲幅度均衡。实验中在调制频率约 2 GHz 时验证了理论分析的结果。

关键词: 光纤激光器; 有理数谐波锁模; 脉冲幅度均衡; 时域分析

中图分类号: O438 文献标识码: A

1 引 言

主动锁模光纤激光器产生的高重复频率的超短脉冲具有非常广泛的应用。当外加调制频率 $f_m = Nf_0$ 时 (f_0 为环形腔基频, N 为正整数), 工作在谐波锁模状态的锁模激光器可以产生重复频率与调制频率相同的光脉冲。利用有理数谐波锁模技术, 通过调整 f_m 产生一个微小偏移 $\Delta f = f_0/p$, 可以使输出的光脉冲的重复频率达到 pf_m , 这样可以突破调制器带宽的限制而产生更高频率的超短脉冲^[1]。目前国际上可以获得最高阶数为 22 阶^[2]或重复频率高达 80~200 GHz 的有理数谐波锁模脉冲^[3]。但在这种技术中, 由于存在一个频率失谐, 除 2 阶有理数谐波锁模以外, 其他高阶的有理数谐波锁模脉冲都存在严重的幅度不均衡的现象, 这给实际应用带来很大的困难。为此, 已有利用半导体光放大环境^[4], 非线性光放大环境^[5,6] 和非线性偏振旋转技术^[7] 等方法来对脉冲进行均衡。本文提出了一种结构简单的, 使调制器在环形腔内既作为锁模器件又作为脉冲幅度均衡器件的脉冲均衡方法, 可以在不多加任何其它器件的情况下, 实现小于 5 阶的有理数谐波锁模的脉冲幅度均衡。

2 实验装置与原理

图 1 为这种主动锁模环形腔光纤激光器的实验

装置图。环形腔内的增益由一段长为 22 m, 由 980 nm 半导体激光器抽运的铒光纤 (EDF) 提供, 抽运功率约为 90 mW。腔内用到的调制器为平衡马赫-曾德尔型 LiNbO₃ 电光强度调制器, 其插入损耗约为 3 dB, 回波损耗约为 -45 dB。调制器被直流偏置 (DC bias) 于其调制特性曲线的线性区, 由一频率可调的正弦信号发生器产生的调制信号 (RF driver) 加在调制器的射频端口上, 信号功率约为 15 dBm。因为调制器为偏振敏感器件, 所以在它两端各加一偏振控制器 (PC1 和 PC2) 用来调整从两个不同方向进入调制器的光的偏振态, 以获得所需要的调制深度。环形腔内的波长选择器件为一中心波长为 1556.8 nm 的光纤光栅 (FBG), 光栅的反射率约为 99.7%, 3 dB 带宽约为 0.8 nm。在腔内运转的光脉冲的一部分通过一 9:1 耦合器的 10% 端口输出, 并用一带宽为 20 GHz 的带光口的数字示波器进行检测。

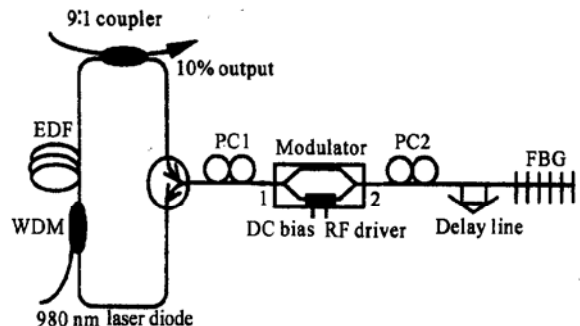


Fig. 1 Experimental setup of the mode locked fiber ring laser

同已有的环形腔主动锁模光纤激光器相比较, 采用这种结构的最大特点就是光脉冲在腔内运转一圈时, 要从两个不同的方向先后两次通过调制器, 受到两次调制作用。尽管只有一个调制信号加在调制

* 国家自然科学基金 (60137010) 资助课题。

E-mail: yanyshiquan@eyou.com

收稿日期: 2002-07-29; 收到修改稿日期: 2002-09-16

器上,但由于从不同方向进入调制器的光的偏振态可以不相同,所以前后两次光信号在通过调制器时受到的调制深度也是不同的。因此可以将腔内运转的光脉冲视为在一圈内通过两个独立的调制器,而且两个调制器工作在同一直流偏置点上,所加调制信号的频率也相同,不过它们对光信号的调制深度可以不同。两个调制器的综合作用使有理数谐波锁模的光脉冲有可能在调制器工作在线性工作区的情况下实现脉冲幅度的均衡。

为了分析这种结构的锁模激光器所产生的有理数谐波锁模光脉冲的情况,我们采用了在文献[8]中用到的时域分析的方法对激光器进行模拟。其原理是假设一初始形状为高斯形的脉冲在环形腔内运转,在运转一圈中受到增益介质,滤波器(光栅)和调制器的影响。对于 p 阶有理数谐波锁模的情况,如果该脉冲在腔内运转 p 圈后回复到原来的形状,我们就可以认为激光器工作在稳定的状态。这时通过分析该脉冲运转第 1 圈,第 2 圈, ..., 第 p 圈后的情况可以得到输出脉冲序列的形状。光脉冲在腔内运转一圈内要两次通过调制器,但两次所受到的调制情况是不同的。假设光信号从 1 端进入调制器的情况下所受到的调制函数可以表示为

$$T_{12}(t) = (1 - \alpha_{12}) \left[1 + \cos \left[\pi \frac{V_b + V_{m12} \sin(\omega_m t)}{V_\pi} \right] \right],$$

其中 α_{12} 为从调制器 1 端到 2 端的插入损耗, V_π 为调制器的半波电压, V_b 为外加直流偏置电压, V_{m12} 为在这个方向上的调制器的有效工作电压, ω_m 为调制信号的频率。则光脉冲在第二次从 2 端进入调制器时所受到的调制函数可以相应表示为

$$T_{21}(t) = (1 - \alpha_{21}) \left[1 + \cos \left[\pi \frac{V_b + V_{m21} \sin(\omega_m t + \phi)}{V_\pi} \right] \right],$$

其中 α_{21} 和 V_{m21} 分别为从调制器 2 端到 1 端的插入损耗和有效工作电压, $\phi = 2nl\omega_m/c$ 为光脉冲再次进入到调制器时的相位,这里 n 为光纤的有效折射率, l 为调制器到光纤光栅之间的光纤长度, c 为光速。 ϕ 的大小可以通过调整光延迟线(Delay line)而改变光脉冲两次进入调制器之间的光程来改变。 α_{12} , V_{m12} 以及 α_{21} , V_{m21} 可以通过调整 PC1 和 PC2 的状态而分别进行调整以获得在某一方向上所需要的损耗和调制深度。

图 2 为通过时域分析法进行模拟而得到 2 到 4 阶有理数谐波锁模的光脉冲序列及对应的调制曲线。

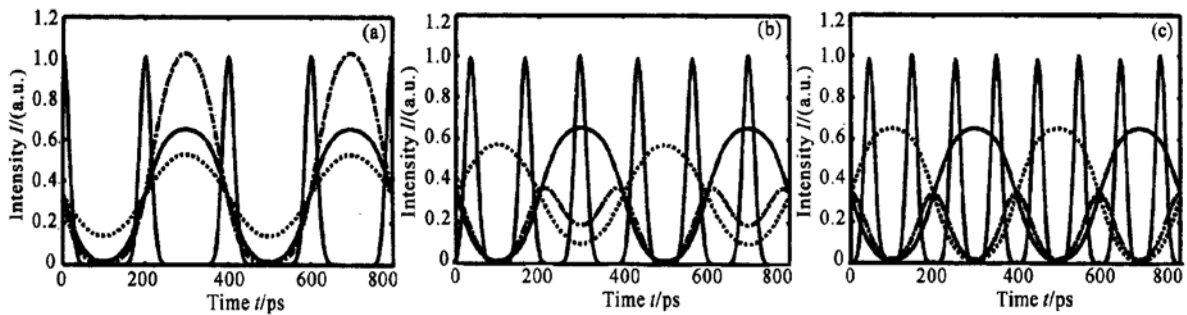


Fig. 2 Simulated pulse train and the transfer functions of the modulator for p -order rational harmonic mode locking when the modulator is biased at $V_b/V_\pi = 0.5$. The RF frequency is 2.5 GHz. The solid line is T_{12} , the dotted line is T_{21} , the dash-dot line is $T = T_{12} \times T_{21}$. (a) $p = 2$, $V_{m12}/V_\pi = 0.4$, $V_{m21}/V_\pi = 0.2$ and $\phi = 2m\pi$ (m is a positive integer); (b) $p = 3$, $V_{m12}/V_\pi = 0.4$, $V_{m21}/V_\pi = 0.25$ and $\phi = 2(m+1)\pi$; (c) $p = 4$, $V_{m12}/V_\pi = 0.4$, $V_{m21}/V_\pi = 0.4$ and $\phi = (2m+1)\pi$

可以看出采用这种结构,当调制器工作在调制曲线的线性区域时,通过选择合适的调制参量,在有理数谐波锁模的阶数小于 5 的情况下可以获得幅度均衡的光脉冲信号。让调制器工作在调制曲线的线性区可以避免因为其工作在线性区时由于工作点的偏移而造成的调制函数曲线的变形,从而进一步导致脉冲质量的恶化的不良结果。而调制器工作点的偏移是由于直流偏置的不稳定或环境影响而造成的,这在调

制器长期工作时是很难避免的。但当其工作在线性区时这种工作点的偏移对调制函数曲线的影响就相对要小的多,这更有利于激光器的长期稳定工作。经模拟还可以发现,如果不考虑脉冲宽度影响的话,获得幅度均衡的光脉冲输出的条件是所有光信号在腔内运转一圈并先后两次通过调制器时受到的两次调制损耗的积要相同。或者说,对于 p 阶有理数谐波锁模 ($p < 5$), $T_{12}(t)$ 和 $T_{21}(t)$ 的乘积在一个周期内要有

p 个等损耗点才可以实现光脉冲信号的幅度均衡。这个结论与文献[8, 9] 中的结果是基本一致。但实际上脉冲是有一定宽度的, 考虑这个因素后脉冲的幅度只能作到近似的均衡。这点在图 2 的(b) 和(c) 中可以看出, 相邻的脉冲之间有一定的幅度差别, 不过已经非常小了。

3 实验结果与讨论

实验中测得锁模激光器的基频约为 2.9766 MHz, 由此计算得到激光器的腔长约为 69.2 m。调整直流偏置的电压使调制器工作在线性区的中点附近($V_b/V_{\pi} = 0.5$), 调整 PC1 的状态, 使调制器从 1 端到 2 端的调制达到最好的状态, 这时对应的调制深度($2V_{m12}/V_{\pi}$) 约为 0.8。在实验中调整 PC2 的状态来改变调制器从 2 端到 1 端的调制深度($2V_{m21}/V_{\pi}$), 调整光延迟线的状态来改变 ϕ 的大小以达到获得脉冲幅度均衡的条件。图 3 所示为调制频率(f_{RF}) 为 2488.44 MHz ($836f_0$, 谐波锁模), 2489.93 MHz [$(836 + 1/2)f_0$, $p = 2$], 2001.44 MHz [$(672 + 1/3)f_0$, $p = 3$] 和 2002.62 MHz [$(673 - 1/4)f_0$,

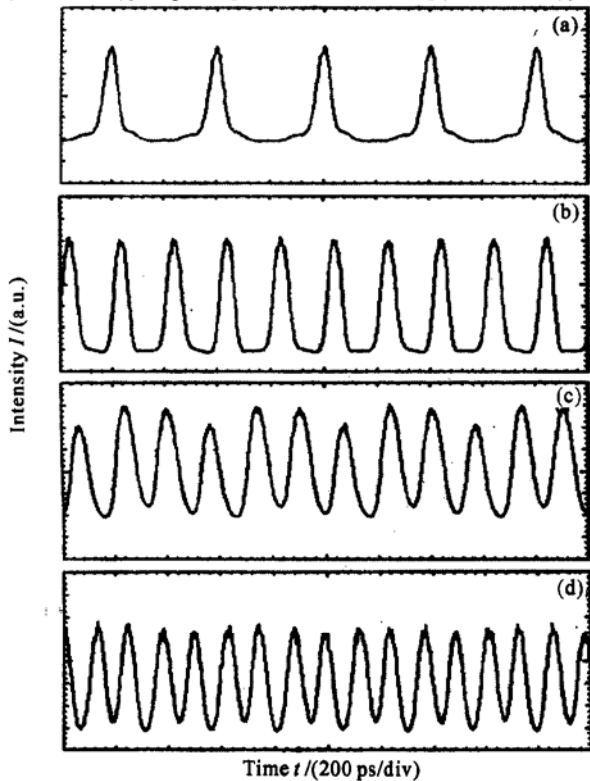


Fig. 3 Waveforms of pulses at various RF drive frequencies. (a) $f_{RF} = 2488.44$ MHz, harmonic model locking; (b) $f_{RF} = 2489.93$ MHz, $p = 2$; (c) $f_{RF} = 2001.44$ MHz, $p = 3$; (d) $f_{RF} = 2002.62$ MHz, $p = 4$

$p = 4$] 时所获得的不同阶数有理数谐波锁模的输出光脉冲序列。可以看出这种结构的激光器不仅可以保持谐波锁模和 2 阶有理数谐波锁模时比较好的脉冲结果, 对于 3 阶和 4 阶的情况也能获得较好的脉冲均衡结果。不过由于在实验过程中需要调整光延迟线, 因此 3 阶和 4 阶有理数谐波锁模时的基频与 2 阶谐波锁模时的基频并不一样, 但差别不是很大。

应该注意的是 3 阶和 4 阶的实验结果和理论模拟结果比起来脉冲的不均衡程度要稍大一些, 这主要是因为实验中由于腔内色散等原因使得脉冲宽度要大于理论模拟得到的脉冲宽度。在脉冲宽度较大时, 要达到更好的脉冲幅度均衡结果, 不但要求两次调制函数的乘积在一个周期内有多个等损耗点, 还要求等损耗点附近的函数形状要尽量相同, 而这在实际上是很难达到的, 所以在脉冲宽度越大的情况下脉冲幅度均衡的效果也就越差。要想达到更好的实验结果应该进一步优化腔内环境, 减小脉冲的宽度。

结论 本文提出了一种实现 5 阶以下有理数谐波锁模脉冲幅度均衡的简单方法。在环形腔内使脉冲运转一圈中往复通过调制器两次, 使调制器既作为腔内的锁模器件, 同时又作为脉冲幅度的均衡器件。用时域分析法分析了获得均衡脉冲所需要的条件并在实验中得到较好的结果。

参 考 文 献

- 1 Ahmed Z, Onodera N. High repetition rate optical pulse generation by frequency multiplication in actively mode locked fibre ring lasers. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(5): 455~ 457
- 2 Wu C, Dutta N K. High repetition rate optical pulse generation using a rational harmonic mode-locked fiber laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(2): 145~ 150
- 3 Yoshida E, Nakazawa M. 80~ 200 GHz erbium doped fibre laser using a rational harmonic mode-locking technique. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(18): 1370~ 1372
- 4 Lee H J, Kim K, Kim H G. Pulse amplitude equalization of rational harmonic mode-locked fiber laser using a semiconductor optical amplifier loop mirror. *Opt. Commun.*, 1999, **160**(1): 51~ 56
- 5 Jeon M Y, Lee H K, Ahn J T *et al.*. External fibre laser based pulse amplitude equalization scheme for rational harmonic mode locking in a ring-type fibre laser. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(2): 182~ 184
- 6 Jeon M Y, Lee H K, Ahn J T *et al.*. Pulse amplitude-equalized output from a rational harmonic mode-locked fiber laser. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11): 855~ 857
- 7 Li Z, Lou C, Chan K T *et al.*. Theoretical and experimental study of pulse amplitude equalization in a rational harmonic mode-locked fiber ring laser. *IEEE J. Quant. Electron.*,

- 2001, **37**(1): 33~ 37
- 8 Zhu G, Chen H, Dutta N. Time domain analysis of a rational harmonic mode locked ring fiber laser. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(5): 2143~ 2147
- 9 Kiyon R, Deparis O, Pottiez O *et al.*. Properties of the pulse train generated by repetition rate doubling rational harmonic actively mode-locked Er-doped fiber lasers. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1439~ 1441

Pulse Amplitude Equalization in a Rational Harmonic Mode Locked Fiber Ring Laser

Yang Shiquan Li Zhaohui Zhao Chunliu Yuan Shuzhong Dong Xiaoyi

(*Institute Of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 29 July 2002; revised 29 September 2002)

Abstract: By letting the pulses pass through an electrooptic intensity modulator twice, a simple method for the amplitude equalization of high repetition rate pulses generated from a p -order rational harmonic mode-locked fiber ring laser when $p < 5$ was proposed. The modulator was used as both a mode-locker and a pulse-amplitude-equalizer in the cavity. A theoretical explanation based on time domain analysis was used to find appropriate parameters to obtain equalized pulse train and the experimental results agree with the theory.

Key words: fiber laser; rational harmonic mode locking; pulse amplitude equalization; time domain analysis