

主动锁模掺铒光纤环形激光器 有理数谐波调制技术

王 林 于晋龙 马晓红 杨恩泽 张以谟 陈才和 黄 超 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 国家教委光电子信息工程开放实验室, 天津 300072)

(1998 年 6 月 24 日收到; 1998 年 8 月 17 日收到修改稿)

成功地利用有理数谐波锁模技术在主动谐波锁模掺铒光纤环形激光器中获取数倍于调制频率 f_m 的高重复率脉冲序列, 所得最高锁模脉冲重复频率 $f_p = 4 f_m \approx 6 \text{ GHz}$. 根据实验结果, 本文指出有理数谐波锁模输出高阶光脉冲的物理机制、导致高阶输出脉冲脉宽展宽和幅度不稳定的原因以及消除幅度不稳定的具体办法.

PACC: 4260F; 4265K; 4280B

1 引 言

具有高重复率的超短光脉冲源, 是未来超高速大容量光纤通信所不可缺少的通信器件, 在目前众多有潜力的光源中, 主动谐波锁模掺铒光纤环形激光器(AHML-EDFL)倍受人们重视. 它与半导体激光器相比, 具有输出脉宽窄、峰值功率高、脉冲质量好和重复频率稳定并能方便在 GHz 范围(1—100 GHz)内产生高质量皮秒脉冲序列^[1], 由于主动锁模光纤激光器腔体灵活, 易于采用各种技术来达到稳定输出光脉冲目的^[2], 所输出光脉冲具有形状对称、中心波长易于调谐, 可直接产生无频率啁啾的近变换极限光脉冲, 因而很适合作为线性高速光纤通信系统或光孤子通信系统的光源.

通常对主动谐波锁模激光器的调制是使调制频率 f_m 等于谐振腔的谐振基频(纵模间隔) f_{bsc} 的整数倍($f_m = m f_{\text{bsc}}$), 由此得到输出重复频率为 $f_p = f_m$ 的脉冲序列. 然而在激光技术方面出现了一项十分令人瞩目的新技术, 即有理数谐波锁模(RHML)技术. 该技术首先由墨尔本大学 Onodera 等人在做主动锁模半导体激光器实验时, 通过微失谐调制($f_m \neq m f_{\text{bsc}}$)即调制频率与谐振频率存在一定的偏移(失谐量), 成功地获取高重复率光脉冲^[3]. 我们将该技术应用到主动谐波锁模掺铒光纤环形激光器上, 在 1 GHz 量级较低速率的调制频率下, 成功的获得 1—4 阶有理数谐波锁模输出脉冲序列, 所获得最高重复频率约为 6 GHz.

2 实 验

实验装置如图 1 所示, 在不加调制信号情形下, 测出腔体基频 $f_{\text{bsc}} = 7.97 \text{ MHz}$, 由

$f_{\text{bsc}} = \frac{c}{\mu L}$, 可知环形腔腔长 $L = \frac{c}{\mu f_{\text{bsc}}} = 26 \text{ m}$. 实验中所用的 LiNbO_3 强度调制器带宽为 $0\text{--}3 \text{ GHz}$, 半波电压 $V_\pi = 3.6 \text{ V}$, 角调制 F-P 光学带通滤波器带宽是 0.5 nm , 可调谐范围为 $1.4\text{--}1.6 \mu\text{m}$; 射频驱动电路(RF)将误码仪所产生的正弦信号放大使其峰值电压

$V_{\text{p-p}} \geq 4 \text{ V}$ 以作为光调制器的驱动电源, 误码仪频带宽度为 $1 \text{ MHz}\text{--}1.4 \text{ GHz}$, 步频为 2 kHz , EDFA 的输出功率为 2 mW . 仔细调节调制器的直流偏压, 即改变调制深度, 使模间耦合功率加强, 当直流偏压 $V_{\text{bias}} = 5.7 \text{ V}$ 时, 所得的输出脉冲较好, 经多次实验我们得出有理数谐波锁模时的失谐调制频率 f_m 与激光器输出脉冲的重复频率 f_p 满足以下两式:

$$f_m = (m \pm 1/n) f_{\text{bsc}}, \quad (1)$$

$$f_p = n f_m = (mn \pm 1) f_{\text{bsc}}. \quad (2)$$

以上两式中的 m 和 n 均为正整数, (2) 式右边第二项取“+”号还是“-”号应与(1)式一致. 实验发现 RHML 维持某阶光脉冲输出可调谐范围为 $\pm 2 \text{ kHz}$. 当(1)式中的 $n=1$ 时, 如实验中取 $f_{m1} = (173+1) f_{\text{bsc}} = 1.393 \text{ GHz}$ 时, 有 $f_p = f_{m1}$ 此时为通常的谐波锁模, 而当 $n=2$ 时, 例如使 $f_{m2}^+ = (174+1/2) f_{\text{bsc}} = 1390 \text{ MHz}$ 或 $f_{m2}^- = (174-1/2) f_{\text{bsc}} = 1382.64 \text{ MHz}$ 时, 我们观察到了 RHML 运转, 其所对应的输出重复频率分别为 $f_{p2}^+ = 2 f_{m2}^+ = (2 \times 174+1) f_{\text{bsc}} = 2.782 \text{ GHz}$ 和 $f_{p2}^- = 2 f_{m2}^- = (2 \times 174-1) f_{\text{bsc}} = 2.765 \text{ GHz}$. 实验结果表明不论 m 为何值, RHML 的阶数只取决于 n . 图 2, 图 3, 图 4 和图 5 分别表示 $n=1, 2, 3, 4$ 即从无失谐调制到失谐量为 $f_{\text{bsc}}/2, f_{\text{bsc}}/3$ 和 $f_{\text{bsc}}/4$ 时激光器输出的 1, 2, 3 和 4 阶 RHML 脉冲序列. 此外, 我们发现若所用的信号源输出的正弦波含有较丰富的谐波分量将有助于高阶谐波锁模.

3 实验结果分析

RHML 技术产生高阶脉冲输出的物理机制是腔内循环脉冲与调制器的周期性损耗相互均衡作用所致. 当调制频率与腔体谐振频率不一致即存在一失谐量 f_{bsc}/n 时, 它对腔内运行脉冲的影响表现为引入一个附加相移 ϕ , 这相当于对腔内所有振荡脉冲起到一个与损耗有关的延时作用, 延时的大小与失谐量多少即谐波锁模阶数 n 的关系为 T/n (T 为调制器的调制周期). 从时域上看腔内振荡脉冲所受增益和损耗是交替进行的. 例如对于 $f_p = 2 f_m$, 因失谐量为 $f_{\text{bsc}}/2$, 这样使得腔内每一个振荡脉冲都被延时 $T/2$ 如图 6 所示, 设脉冲 A 原起始于损耗最小处, 当激光器未处于失谐状态时, 该脉冲在腔内运行一周后本应仍处在损耗最小处. 但由于谐振腔处于失谐状态, 使腔内所有脉冲都产生 $T/2$ 延时, 即产生了一个 $2\pi/2$ 的附加相移. 这就使得脉冲 A 在腔内运行一周后正值损耗最大

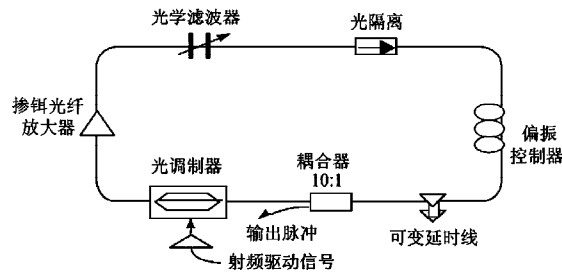


图 1 主动谐波锁模掺铒光纤环形激光器结构示意图

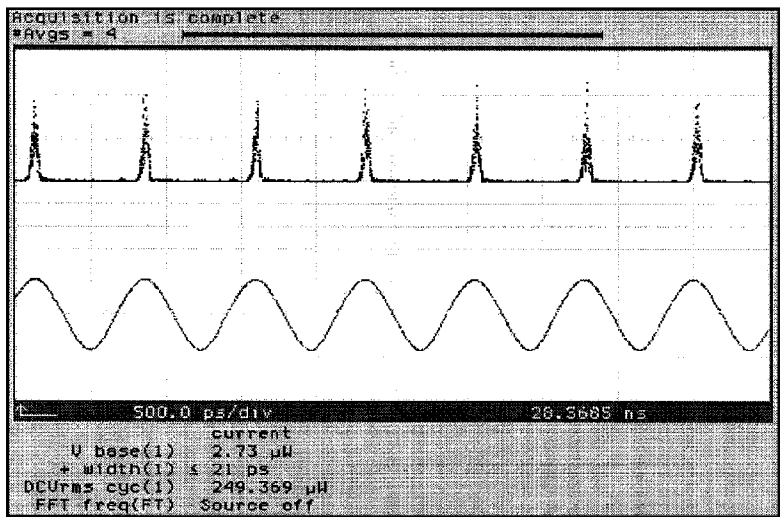


图 2 RHML-EDFL 输出 1 阶脉冲序列

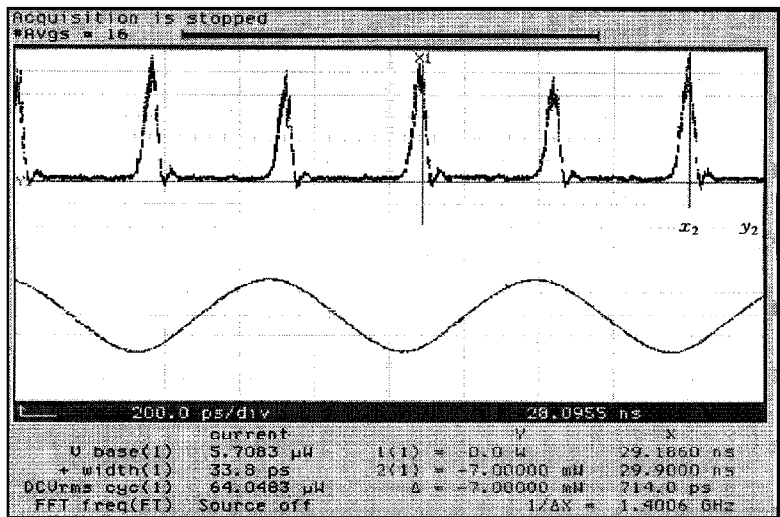


图 3 RHML-EDFL 输出 2 阶脉冲序列

处,此时该脉冲幅度很小,当它在腔内再运行一周后,即在腔内第二次循环时,它又产生了一个 π 相移也就是又被延时 $T/2$,此时它必然处在损耗最小处即获得最大增益.虽然 LiNbO_3 强度调制器对腔内相邻脉冲运行一周后的调制幅度并不相等,但经两周后由于每一个脉冲都经历上述同样过程,腔内所有的调制峰($2m \pm 1$ 个)均得到相同增益而趋于相等.由此我们可看出 RHLM 造成延时的效果无疑是使腔内运行的脉冲个数加倍,即从常规锁模(NHML)的 $m \pm 1$ 个增加到 RHML 的 $2m \pm 1$ 个,从而导致倍频脉冲产生.同理不难推得 n 次倍频的情况.比较图 2,图 3,图 4 和图 5 可看出,当重复频率升高时,脉宽也相

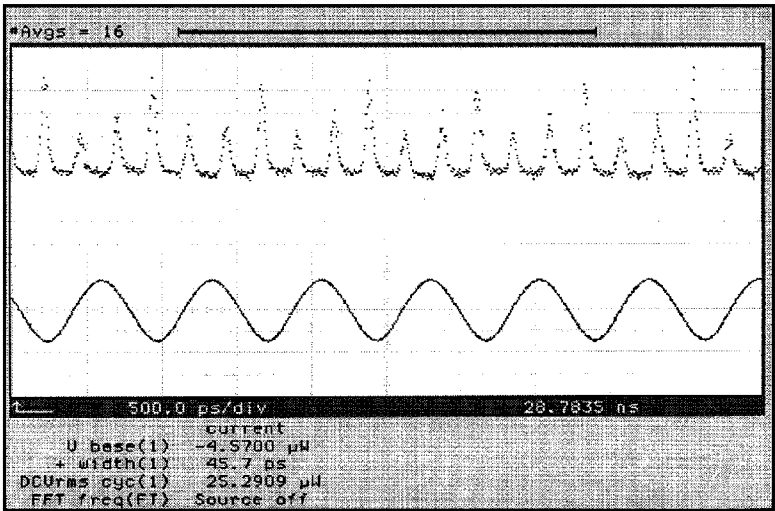


图 4 RHML-EDFL 输出 3 阶脉冲序列

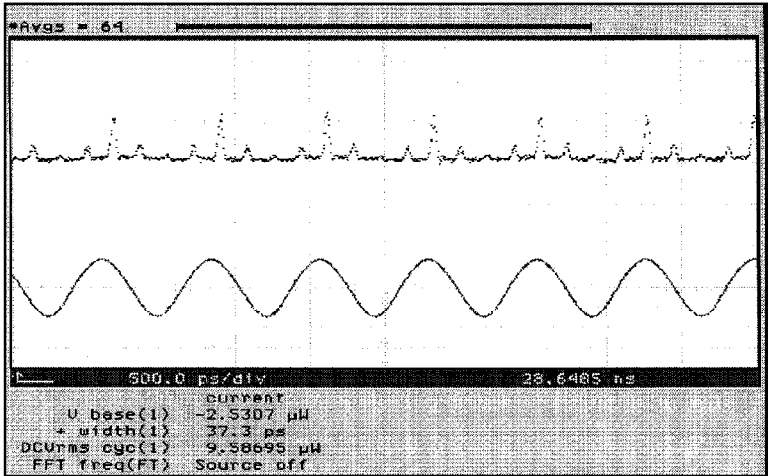


图 5 RHML-EDFL 输出 4 阶脉冲序列

应被展宽,我们认为导致脉宽展宽的原因有两方面:一是因为在抽运功率一定的情况下,腔内脉冲个数的增加导致脉冲峰值功率的下降,致使自相位(SPM)压缩脉宽的效果减弱;二是随着 RHLM 谐波锁模阶数的上升,失谐量 f_{bsc}/n 对腔内脉冲附加相移所导致的腔内脉冲运行距离倍增致使 GVD 效应增强.

由于 AHML-EDFL 纵模较为丰富,激光器表现为丰富的受激振荡行为.为了有效消除超模噪声,我们在谐振腔中安置了一个光学滤波器(F-P 干涉仪),调节 F-P 干涉仪间隙使其自由光谱区与调制频率相等来达到选频目的,这时只有谐振频率与 F-P 干涉仪的峰值频率相一致的超模才能振荡而其他超模被有效地抑制,事实上这是通过压缩谱宽来减

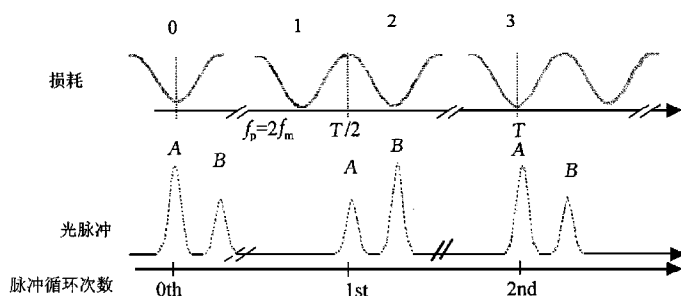


图6 谐波锁模倍频输出光脉冲的物理过程

少超模噪声. 实验证实了 F-P 干涉仪能有效抑制了输出脉冲幅度的波动, 尤其对较低阶的谐波锁模, 如 $n=2$ 时所输出光脉冲效果很好, 脉冲非常稳定, 这与 Nakazawa 等人的实验结果相一致^[4]. 然而, 从图 5 可看出 4 倍频时各个脉冲幅度涨落(波动)较大, 我们认为导致 RHML 高阶 ($n>2$) 输出脉冲幅度不等的原因有两个: 一是超模噪声; 二是幅度噪声. 前者对激光器输出脉冲产生无规扰动, 后者则对激光器的输出脉冲产生有规律的不等幅波动, 幅度噪声在 RHML 中是不可避免的, 其诱因是失配的低阶谐波所为, 因此这种影响随着谐波锁模的阶数上升而加强, 其结果使得 n 阶 RHML 谐波输出的光脉冲序列随着 n 的增加, 峰-峰值波动加大. 从图 5 可看出 4 阶光脉冲的背景噪声就主要是幅度噪声(峰-峰值波动). 不过由未配对的较低阶谐波对高阶谐波主动锁模激光器的作用只是强烈修正 n 阶输出脉冲的幅度, 但它并不影响输出脉冲的频率, 因为高重复率锁模脉冲序列的产生仅仅只取决于已配对谐波的相位锁定.

4 结 论

我们通过有理数谐波锁模技术在较短腔长(26 m)的主动锁模掺铒光纤环形激光器上进行了调制速率为 1 GHz 量级的实验, 实验证实了各阶 RHML 现象的存在, 并与 Yoshida 等人在长腔长(90 m)和较高驱动频率(40 GHz)下所观察到的现象基本一致^[6]. 实验结果表明 2 阶 RHML 的稳定性很好, 3 阶和 3 阶以上的 RHML 稳定性较差, 所得到的最高输出脉冲重复频率约为 6 GHz, 并发现维持某阶脉冲输出的可调谐范围为 ± 2 kHz. 对高阶 RHML-EDFL 输出脉冲幅度均衡方法有两种: 一是通过自相位调制和光学滤波器来抑制超模噪声^[7]; 二是目前正在尝试利用非现性光学环行镜(NOLM)的调制特性对 RHML-EDFL 输出脉冲进行幅度均衡. 由于 RHML 只需对调制器的驱动频率改变一个很小的量(有理数失谐量)就可使输出脉冲重复频率成倍改变, 因此该技术非常有用, 它克服了主动锁模光纤激光器输出最高频率受调制器和驱动电源的上限截止频率限制的缺陷, 是获得高重复率脉冲序列行之有效的方法. 随着超大容量的 WDM/OTDM 日趋商业化, RHML-EDFL 极有可能在全光纤超连续脉冲光源中扮演重要角色, 并对超高速大容量光纤通信产生积极的影响.

感谢天津光纤信息技术联合开发公司蔺伯平高级工程师为实验提供高品质的掺铒光纤放大器。

- [1] Eiji Yoshida, Masataka Nakazawa, *Optics Lett.*, **22**(1997), 1409.
- [2] M. Nakazawa, E. Yoshida, *Electron Lett.*, **33**(1997), 1318.
- [3] N. Onodera, A. J. Lowery, *Appl Phys Lett.*, **62**(1993), 1329.
- [4] M. Nakazawa, K. Tamura, *Electron Lett.*, **32**(1996), 461.
- [5] Z. Anmed, N. Onodera, *Electron Lett.*, **32**(1996), 455.
- [6] E. Yoshida, M. Nakazawa, *Electron Lett.*, **32**(1996), 1370.
- [7] M. Nakazawa, K. Tamara, E. Yoshida, *Electron Lett.*, **32**(1996), 461.

1.4—6 GHz ERBIUM DOPED FIBER LASER USING RATIONAL HARMONIC MODE-LOCKING TECHNIQUE

WANG LIN YU JIN-LONG MA XIAO-HONG YANG EN-ZE
ZHANG YI-MO CHEN CAI-HE HUANG CHAO LI SHI-CHEN

(Tianjin University, Precision Instrument and Optical
Electronics Engineering College, Tianjin 300072)

(Received 24 June 1998; revised manuscript received 17 August 1998)

ABSTRACT

By means of the technique of rational harmonic mode-locking(RHML), we succeeded in obtaining the optical pulses at repetition rate (f_p) being integer multiples of the RF drive frequency($f_m \approx 1.4$ GHz) with detuning ratio of $> 10^{-6}$. The generation of maximum frequency was about 6 GHz and the stable rational harmonic mode-locking occurs only at $f_p = 2 f_m$. According to the result of our experiments, we put forth a possible mechanism of using RHML to generate high bit-rate pulses and point out the cause of the occurrence of instability in higher RHML. Furthermore, we demonstrate an effective method to eliminate the amplitude fluctuations of output pulse train.

PACC: 4260F; 4265K; 4280B